

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Experimentální výroba mechanických
mikrovlnných komponent pomocí aditivní
výroby**

Experimental Production of Mechanical
Microwave Components by Additive
Manufacturing

Student:

Bc. Robert Pecha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robert Pecha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Experimentální výroba mechanických mikrovlnných komponent pomocí
aditivní výroby
Experimental Production of Mechanical Microwave Components by
Additive Manufacturing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav.
3. Návrh nového technologického postupu výroby.
4. Technicko-ekonomické porovnání.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


GIBSON, I; D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 1441911200.
Lorente, A., Mendoza, M., Petersson, Z., et al. *Single Pat Microwave Filters Made From Selective Laser Melting*. Conference paper. November 2009.
T. J. Ecclestone, P. Booth, and A. Dawkins, *Process Selection for Future Single-Feed-Per Beam Feed Chain Components*, 29th ESA Antenna Workshop.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, же - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Robert Pecha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Písařov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PECHA, R. *Experimentální výroba mechanických mikrovlnných komponent pomocí aditivní výroby*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 50 s., 2019, Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá využitím technologie aditivní výroby tvarově složitých součástí, používaných v telekomunikační technice. Teoretická i experimentální část byla zaměřena i na proveditelnost některých povrchových úprav. Byly vyrobeny dvě demonstrační součásti. První byla 11 GHz průchodka vyrobená metodou SLM z nerezové oceli 316L. Druhý byl 24 GHz filtr vyrobený z hliníkové slitiny a následně pokovený vícevrstevným povlakem s vrchní vrstvou stříbra. Experiment je doložen výsledky měření na spektrálním analyzátoru. Vzhledem k očekávanému rozvoji sítí i využití družic pro telekomunikační účely bylo nezbytné vyhodnotit možnosti komerčního využití s cílem dosažení potřebných úspor nákladů výroby i investic.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PECHA, R. *Experimental Production of Mechanical Microwave Components by Additive Manufacturing*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 50 p., 2019, Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Master thesis covers the usage of additive manufacturing technology on complex shape components that are used in telecommunication technology. Both theoretical and practical parts were scoped also on feasibility of some surface treatments. There were manufactured two demonstrating components. First of them, it was manufactured 11 GHz bushing from stainless steel 316L by SLM method. Last one was a 24 GHz filter, which was made of aluminum alloy and then it was plated by a multilayer coating with upper layer of silver. The experiment is documented by measurement results on a spectral analyzer. With respect to predicted development of networks and the usage of satellites for telecommunication purposes it was necessary to evaluate options of the commercial usage with the aim of achieving required savings in production and investment costs.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	2
1. Úvod	3
2. Stručné seznámení s aditivními technologiemi PBF (Powder Bed Fusion)	5
3. Stávající způsob výroby	8
4. Zásady konstrukce a výroby mechanických mikrovlnných součástí	10
5. První zdokumentovaný experiment	14
6. Alternativní použití plastických hmot s metalizací povrchu	16
7. Výroba vysoko výkonových mikrovlnných vlnodů pomocí L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)	18
8. Rozměry a přesnost mechanických mikrovlnných součástí	20
9. Experimentální výroba průchodky pro 11 GHz z nerezové oceli 316L	26
10. Měření průchodky pro 11 GHz na síťovém analyzátoru	28
11. Elektrolytické leštění nerezové oceli 316L	30
12. Možný způsob potažení nerezové oceli 316L hliníkem	33
13. Experimentální výroba filtru pro 24 GHz z hliníkové slitiny AlSi10Mg	35
14. Výpočet penetrační hloubky podle druhu materiálu	36
15. Postup při chemickém stříbření	38
16. Měření 24 GHz filtru na síťovém analyzátoru a zhodnocení výsledků měření ..	42
17. Ekonomické předpoklady pro výrobu prototypů a ověřovací série	44
18. Ekonomické předpoklady pro sériovou výrobu	45
19. Závěr	47
Použitá literatura	49
Poděkování	51

Seznam použitých značek a symbolů

SLM Selective Laser Melting

SLA StereoLithogrAphy

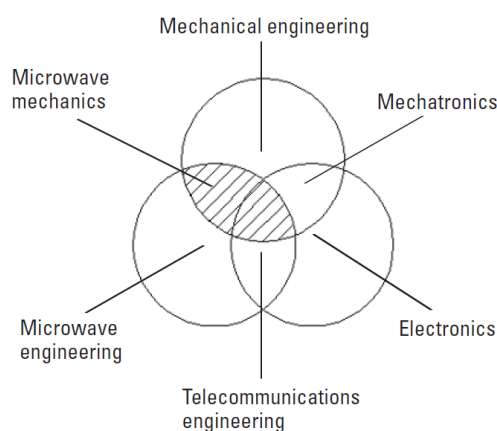
ODU OutDoor Units - vnější jednotka mikrovlnného spoje

SMA Konektor SubMiniature version A definovaný podle MIL-STD-348

1. Úvod

Technologie aditivní výroby prošly v posledních 5 letech popularizační fází, kdy se významně zvýšila jejich dostupnost. Moderní zařízení jsou dostupná i v ČR a pomalu přichází čas zamyslet se nad jejich využitím v komerční sféře v těch oborech, kde je dostatečná přidaná hodnota na úhradu souvisejících finančních nákladů a zároveň potřeba využít zvláštních charakteristik aditivní výroby. V našem případě je myšlena výroba tvarově složitých součástí z kovových slitin metodou SLM, ale v této práci je zmíněno i použití plastů u technologie SLA jako alternativa pro porovnání.

V telekomunikační technice kromě klasických strojírenských součástí jako jsou prvky fixující antény ke stožárům, samotné antény, různé bedny, konstrukce zařízení a racky figurují ještě další mechanické prvky, jako jsou filtry, duplexery, průchodky, cirkulátory, apod., které se přímo podílejí na funkčnosti telekomunikačního zařízení podobně jako paraboly či jiné anténní systémy. Tyto mechanické prvky jsou nedílnou součástí komerčních, výzkumných (např. v družicích ve vesmíru) i vojenských telekomunikačních zařízení, kde zásadně ovlivňují funkčnost a charakteristiku těchto zařízení.



Obr. č. 1 - Schéma různých technologických oborů, které se prolínají při řešení mikrovlnné mechaniky, "mechatronika" je technologický obor obsahující, jak problematiku strojírenského inženýrství, tak i elektrotechniky ¹

V současné době jsou v ČR používány součásti vyrobené konvenčním obráběním, broušením a následnou ruční montáží a laděním. Ve světě je pak v menší míře uplatněná automatizace a nekonvenční technologie výroby, i když zde popsaná technologie SLM je pro popsání účel zatím použita u některých experimentálních a možná (podle předpokladů) vojenských projektů. Aby bylo možné tuto technologii používat při komerčním vývoji mikrovlnných součástí pro výrobu prototypů, bude nutné vyřešit

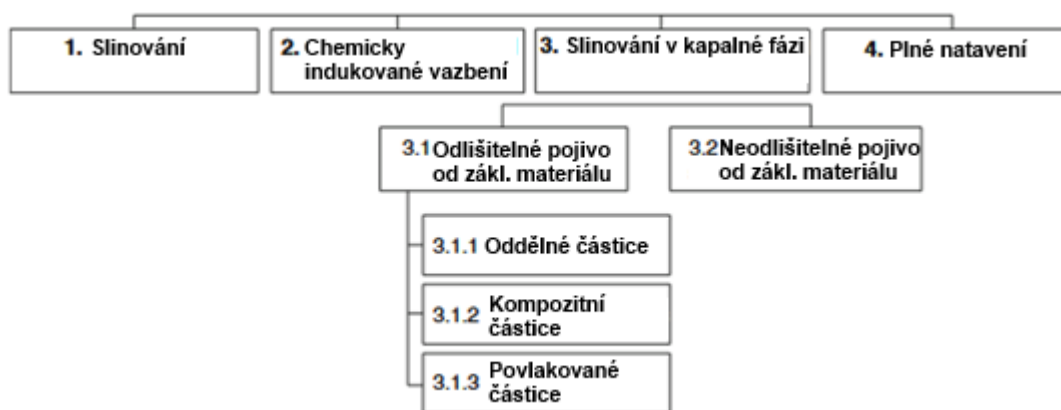
několik technologických výzev. Pro zavedení do sériové výroby je nutno se zabývat hlavně finanční stránkou při větších množstvích. S tím je spjatý stručný rozbor posunu možností SLM v blízké budoucnosti.

Motivací k této práci se stal výzkumný projekt z konce roku 2009 pod záštitou ESA, kdy bylo na 39. ročníku Evropské mikrovlnné konference představeno první vytištění filtru pro pásmo 11 GHz určeného hlavně pro zamýšlené budoucí použití v družicích. Tomu odpovídaly i požadavky na tento filtr. Výzkumníci považovali projekt za úspěšný i s ohledem na to, že se podle nich jednalo o vůbec první filtr na světě vytištěný touto technologií.²

V této práci je kladeno za cíl si teoreticky i experimentálně prověřit vlastnosti mikrovlnných mechanických součástí. Vedlejším cílem práce bude teoreticky i experimentálně vyzkoušet proveditelnost některých povrchových úprav, které jsou hlavně použitelné u mikrovlnných mechanických součástí, ale mohou najít své uplatnění i u jiných využití. Proto jsou zde vyzkoušeny i kombinace povlaků, které by pro úspěšnost hlavního experimentu nebyly nutné a některé teoretické texty jsou obsáhlejší s více argumenty a daty, než by bylo nutné pro odůvodnění řešení hlavní problematiky tj. mikrovlnných mechanických komponent.

2. Stručné seznámení s aditivními technologiemi PBF (Powder Bed Fusion)

Zkratkou PBF je označena skupina technologií, kdy dochází k formování tvaru vyráběné součásti zahříváním bodu ve vrstvě prášku z kovu, umělé hmoty, keramiky či kompozitu a kdy dochází ke slinování, částečnému nebo úplnému natavení částic prášku. Mnozí výrobci dávají svým technologiím marketingová označení, aby se vyhnuli patentové ochraně konkurenčních výrobců nebo aby naopak zdůraznili jejich patentované inovativní prvky a postupy, uplatněné při vývoji jejich zařízení. Na obr. č. 1 je zobrazeno schéma znázorňující jednotlivé principy spojování částic základního materiálu. Pokud je použito pojivo, může jít o plast nebo pryskyřici s menší viskozitou při stejné teplotě jako základní materiál, nebo v případě kovů, o kov, který má menší teplotu tání než základní kovový materiál. V případě keramických materiálů je možno použít polymery i kovy. Co se týče slitin Ti, CoCr nebo nerezovou ocel, je používáno zejména plné natavení částic, kdy takto vyrobené součásti mají mnohdy lepší vlastnosti jak stejné součásti ze stejné slitiny, ale vyrobené kováním či sléváním.¹³

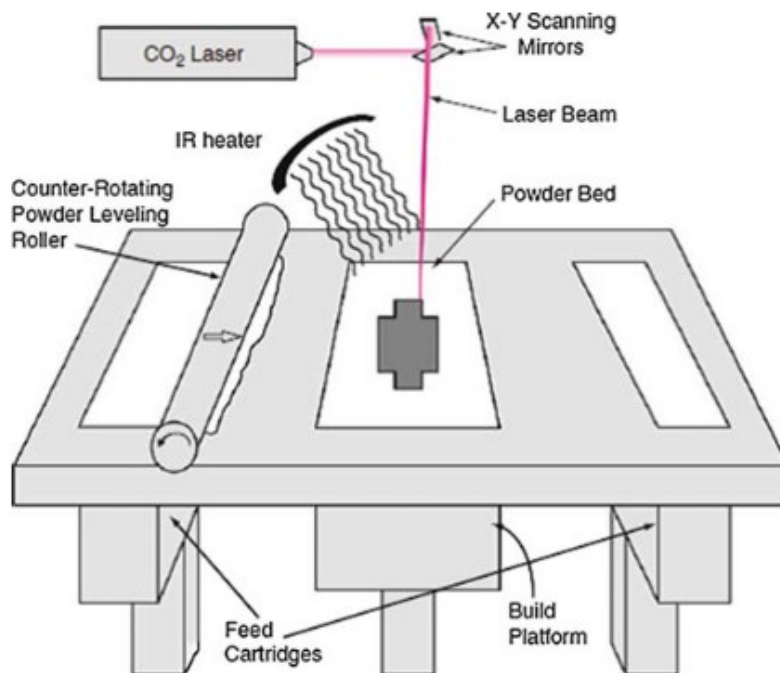


Obr. č. 2 - Základní spojovací mechanismy využívané technologiemi PBF¹³

Jako zdroj bodového ohřevu je využit laser (právě technologie SLM využívaná při experimentu v této práci), elektronový paprsek nebo infrazářič. Při procesu (dále se bude uvažovat spíše SLM, i když většina informací je přenositelná na ostatní podobné technologie) je třeba nastavit celou řadu vzájemně souvisejících parametrů, které je možno rozdělit do 4 skupin:

- Parametry laserového paprsku (výkon, velikost svazku, doba pulzu a frekvence paprsku),

- Parametry skenování (rychlost, rozložení a vzor),
- Vlastnosti práškového materiálu (tvar částic, jejich velikost a hustota, tloušťka nanášené vrstvy a další materiálové vlastnosti),
- Parametry teplot (teplota práškového lůžka, teplota podavače a velikost gradientu teplot).¹³



Obr. č. 3 - Princip všech metod aditivní výroby spékáním či tavením práškových směsí¹³

Běžný stroj zahrnuje dva galvanometry pro dvě navzájem kolmé osy X resp. Y, které jsou použity pro navádění energetického paprsku, který je ze zdroje naváděn soustavou zrcadel. Celá pracovní komora je od okolního prostředí neprodyšně oddělena a do ní napuštěn inertní plyn, nejčastěji Argon. Každá součást musí být „vystavěna“ od základní plochy, aby se předešlo deformacím způsobeným vlivem zbytkových napětí. Míra volnosti je tedy v případě aditivní výroby kovů o něco menší než u polymerů. Práškový materiál je nanášen v rovnoměrných vrstvách válcem. Poté probíhá skenování, kdy energetický paprsek taví materiál ve svrchní vrstvě, čímž jsou jednotlivé částice práškového materiálu spojovány jak mezi sebou tak i s předchozí vrstvou, která je také ovlivněna tavnou lázní. Zbývající práškový materiál, který nebyl nataven, slouží jako podloží pro další vrstvy. Svrchní vrstva je vždy ve stejné hladině ve svislé ose, protože se základní rovina, na které je polotovar součásti umístěn, posunuje směrem dolů vždy o rozměr odpovídající tloušťce jedné nanášené vrstvy práškového materiálu. Pro výsledek procesu je důležité zabránit prudkým výkyvům teplot, čehož je dosaženo dodatečným ohřevem pracovního prostoru např. pomocí infra-ohříváče. Podavač práškového materiálu může být taktéž ohříván na

určitou teplotu stejně jako další části, které přijdou do styku s práškovým materiálem tak, aby bylo jednodušší ohřát prášek nad bod tavení za použití laseru s menším výkonem.¹³

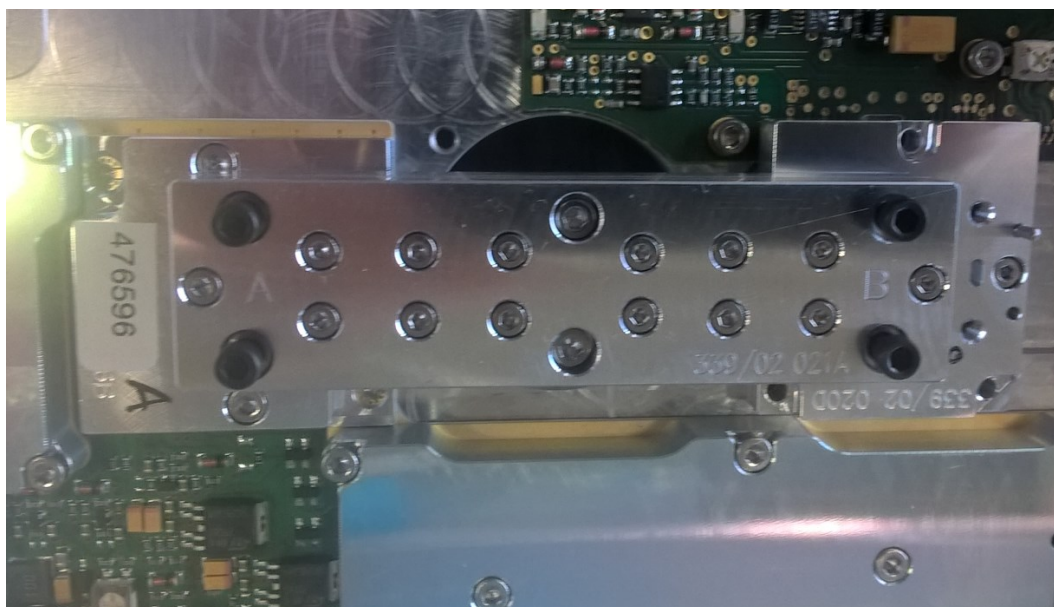
Skenování probíhá v obrysovém a vyplňovacím režimu, kdy je nejprve skenován obrys průmětu součásti do nanášené vrstvy, což je prováděno s důrazem na přesnost a vlastnosti výsledného povrchu součásti. Co se týče vyplňovacího režimu, existuje několik strategií, které se liší vlivem na vlastnosti vyhotovené součásti a např. ovlivňují zbytková napětí v ní. Skenovací linky jsou zpravidla prováděny tak, aby byly vždy kolmé ve dvou na sobě ležících vrstvách nebo alespoň, aby jejich směry ve dvou na sobě ležících vrstvách nesvíraly nulový nebo podobně malý úhel. Běžná tloušťka vrstvy se u komerčně dostupných strojů pohybuje mezi 20 až 150 μm . Hustota komerčně dostupných práškových materiálů se obvykle pohybuje mezi 50 až 60 %.¹³

Světoví výrobci se předhánějí ve funkcích, které nabídnou uživatelům, aby měly navrch před konkurencí. Výrobce Renishaw, jehož zařízení AM400 je použito při experimentech provedených v této práci, je například proslaven zaváděným inovativních bezpečnostních funkcí, které brání samovolnému vznícení práškového materiálu.¹³

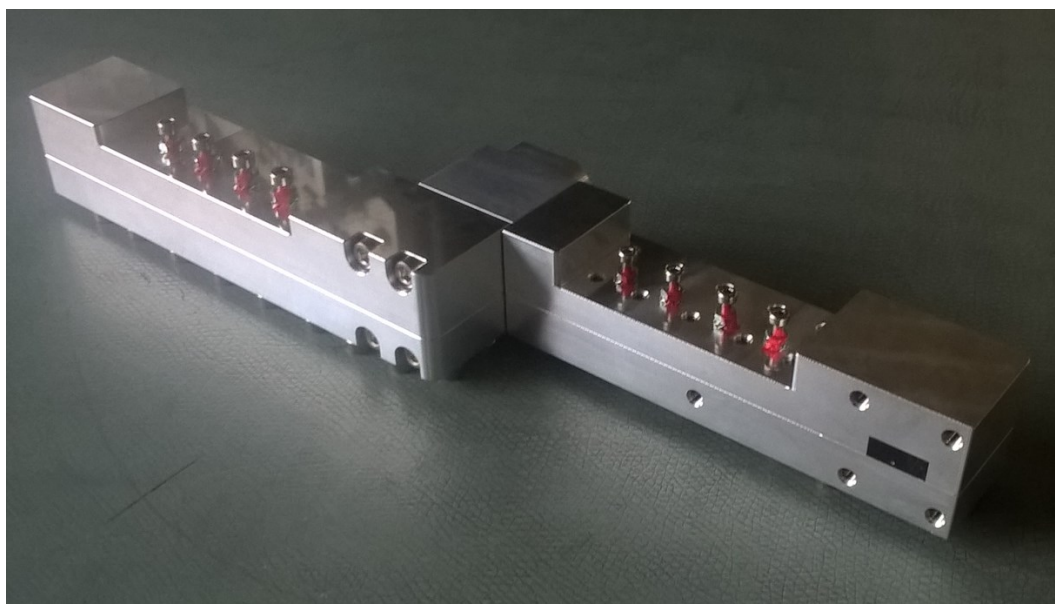
3. Stávající způsob výroby

Pojem mechanických mikrovlnných součástí je docela obecný, protože zahrnuje celou skupinu jednotlivých dílů i sestav dílů, které nemají úplně totožné využití. Mluví-li se v této práci o mechanických mikrovlnných součástech, jsou zejména myšleny ty, jejichž rozměry jsou v řádu větších jednotek či menších desítek centimetrů a jejich funkcí je nějaké zpracování signálu způsobem, jaký navrhnu vývojáři celého funkčního celku – telekomunikačního zařízení.

V současné době jsou mechanické mikrovlnné sestavy montovány z několika samostatných součástí, které jsou vyráběny odléváním, stříháním z plechových plátů anebo obráběním, následným broušením na požadovanou drsnost. Nakonec je prováděna konečná montáž a ruční ladění pomocí ladicích šroubů. V opodstatněných případech je v zahraničí používána prášková metalurgie pro spékání různých keramických kompozitů. Základní materiál je většinou hliníková slitina či ocel a funkční plochy součástí jsou dále pokoveny elektricky dobře vodivým povlakem. Pro díly, kde není očekáván velký rozsah pracovních teplot, jsou také používány plasty jako PE, PTFE nebo dražší PEEK. Konkrétní příklady v podobě osazeného resp. neosazeného diplexeru jsou zobrazeny na Obr. č. 4 resp. Obr. č. 5.¹



Obr. č. 4 - Diplexer smontovaný z několika konvenčně vyrobených součástí osazený ve skříni konečného výrobku tj. vnější jednotce radioreléového spoje tzv. ODU



Obr. č. 5 - Jiné řešení diplexeru s odlišnými parametry mimo skříň radioreléového spoje samostatně tak, aby byla patrná jeho konstrukce a ladící šrouby s výraznými červenými matkami na horní straně diplexeru

4. Zásady konstrukce a výroby mechanických mikrovlnných součástí

Na rozdíl od „klasických“ frézovaných strojařských součástí se probíraná skupina liší v nároku na její funkční vlastnosti. Nejprve je uvedeno několik rad platných při konstruování běžných součástí:

- z polotovaru by měl být odebírán co možná nejmenší objem základního materiálu
- navrhované tvary by měly být souměrné a zaoblení, zkosení by měly být konstantní,
- při návrhu kuželovitých tvarů, které mají být soustruženy, je jednodušší zakončit proces na válcovitém tvaru než na kolmé rovině,
- plocha nebo objem odebíraného materiálu či odstraňované části roviny frézováním by měla být zanesena ve výrobním výkresu,
- mezi stejnými prvky, jako jsou např. otvory pro šrouby, by měly být vždy pravidelně stejné rozměry,
- neměl by být použit systém dvojích tolerancí,
- při návrhu úzkých štěrbin a dutin musí konstruktér při dodržení funkčních vlastností myslet na dostatek místa pro nástroje, na což je zapomínáno hlavně při dokončovacích operacích,
- pokud obrobek příliš dlouhý, slabý nebo ohebný, je třeba přidat podpurné prvky k zabránění kroucení či ohybu vlivem řezných sil,
- je-li v soustruženém otvoru několik různých vnitřních průměrů, mělo by mezi nimi být zkosené rozhraní (místo roviny kolmé na osu otvoru nebo schodovitého přechodu). ¹

Bohužel většinu těchto rad nelze úplně použít při návrhu mechanických mikrovlnných součástí, jak bude demonstrováno dále.

Nejdříve jsou uvedeny typy jednotlivých používaných spojů. Svařované spoje jsou nerozložitelné a při svařování je třeba zohlednit zejména druh spojovaných materiálů. Montované spoje jsou rozložitelné a při jejich návrhu je potřeba zohlednit zejména jejich proveditelnost s ohledem na nedostatek místa pro ruce nebo nástroje montérů. Dalším typem jsou lepené spoje, které jsou dobře použitelné i na různé druhy materiálů jako je rozhraní kovu a plastu. Je však nutné dát si pozor na rozsah teplot, za kterých jsou

adheziva funkční. Tyto spoje mohou být rozložitelné za použití chemických rozpouštědel. Spoje mají u mechanických mikrovlnných součástí několik významů:

- fixace funkčních ploch ve stanovených pozicích,
- dobré těsnění mezi spojovanými plochami, kde vzdálenost mezi povrchy by se ideálně měla blížit k 0 mm ve všech bodech jejich profilu,
- v případě adheziv musí mít dobrou elektrickou vodivost, takže se používají gely a pasty na bázi silikonu či epoxidu, kde vodivost je určena příměsí stříbra.¹

U mechanických mikrovlnných komponent není potřeba odolnost na velká konstantní zatížení (s výjimkou prvků, které jsou součástí některých nosných konstrukcí u antén), ale zato je třeba odolnost vůči dynamickému zatížení (vibrace o velmi velkých frekvencích) a dobrá chemická odolnost. U montovaných spojů by pod šrouby měly být pod matky použity podložky tak, aby se zabránilo jejich uvolnění, aby byl ochráněn povrch spojovaných součástí, aby se zafixoval směr šroubu (čímž se předchází napětí v ohybu) a kvůli rozložení tlaku mezi matkou a povrchem součásti. Pokud je navrhován otvor pro kolík nebo dutina s víkem, musí se vždy použít třída tolerance H, kdy je spodní mez nulová.¹

Výrobci mechanických mikrovlnných součástí se většinou snaží o zlepšení následujících poměrů jednotlivých kritérií důležitých pro funkčnost a s ní spojenou konkurenceschopnost jejich výrobků:

- snížit poměr ceny [Kč] vůči útlumu [dB],
- snížit poměr ceny [Kč] vůči zisku [dB],
- snížit poměr ceny [Kč] vůči úrovni šumu [dB],
- snížit poměr ceny [Kč] vůči fázové chybě (odchylce) [rad],
- snížit poměr ceny [Kč] vůči životnosti [h],
- snížit vzdálenost mezi elektrickými součástmi [m],
- snížit třídu přesnosti [stupeň IT] tak, aby nedošlo ke zvýšení útlumu [dB], snížení zisku [dB] nebo zvýšení úrovně šumu [dB],
- snížit hmotnost [kg], největší rozměry [m] a objem výrobku [m³] (za zcela výjimečných podmínek mohou být větší rozměry důležité kvůli celkovému návrhu pro odvod tepla z aktivních částí celkového telekomunikačního zařízení).¹

Kvůli rozměrným dutinám, na kterých je založen princip fungování mikrovlnných mechanických součástí, nelze dodržet pravidlo, že by mělo být z polotovaru odebíráno minimální množství materiálu. Dutiny jsou frézovány nebo jsou formovány smontováním či svařením přesně nařezaných kovových plátů k sobě. Při svařování se k dosažení lepších vlastností svarů používá v opodstatněných případech laser.¹

Dutiny nemusejí být vždy souměrné a různá zaoblení či zkosení, která jsou součástí funkčních ploch, jsou určovány podle jejich vlivu na celkovou funkčnost. U experimentu v této práci tomu sice tak bylo, ale v odkazované studii z roku 2018 nejsou dutiny souměrné a ani zaoblení či zkosení nemá běžný tvar.^{1,6}

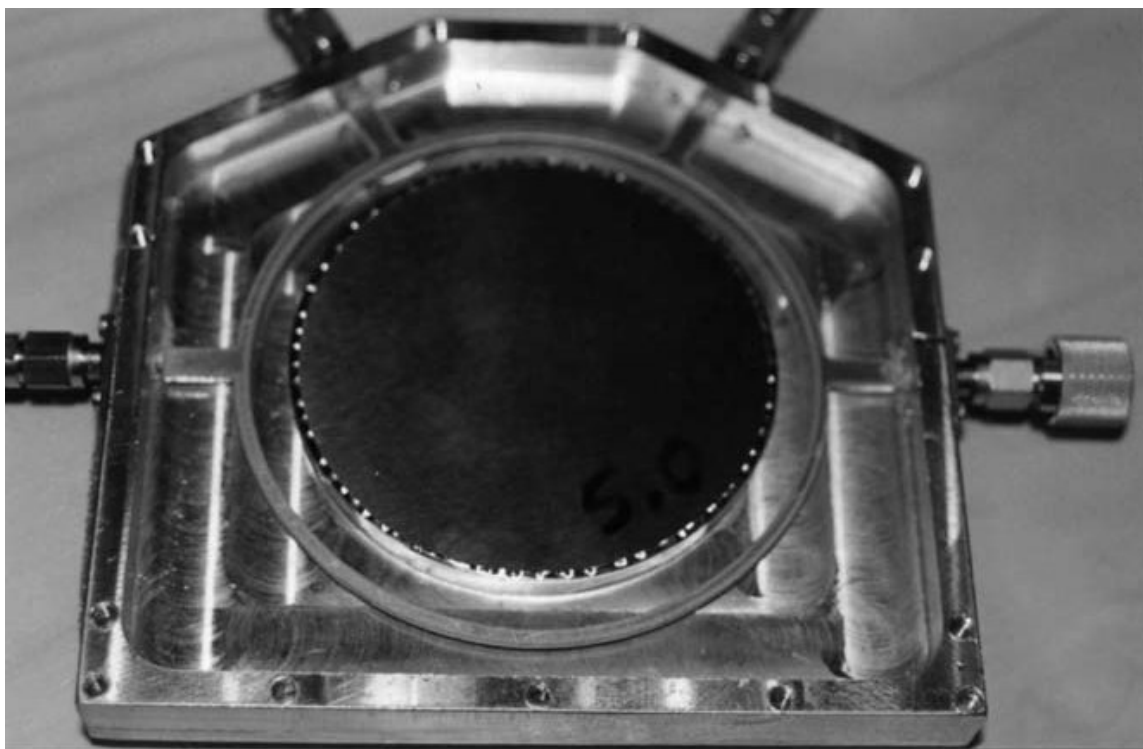
Zbytková napětí, která mohou vzniknout při lisování, svařování nebo obrábění mohou ovlivnit elektromagnetické vlastnosti povrchu součástí. Při volbě technologie pro opracování či formování dutiny je tedy potřeba zajistit, aby zbytková napětí byla co nejmenší. Dalším nebezpečím je oxidace povrchu. Neměly by být používány technologie, u nichž by hrozila jakákoliv minimální oxidace funkčních ploch, pokud na ně nebude aplikována dodatečná povrchová úprava. V případě, že je povrchová úprava aplikována pouze na funkční části, měl by být základní materiál zvolen tak, aby nepodléhal oxidaci či degradaci. Tento výběr by měl být proveden s ohledem na provozní podmínky (zeměpisné umístění i konkrétní aplikace), ve kterých bude fungovat hotové telekomunikační zařízení. Některá zařízení se nacházejí ve vnitřních prostorách, zatímco např. zmíněné ODU jsou chráněny akorát vlastní – zpravidla odlitou – bednou.¹

Dostatek místa není možné zohlednit, protože přesné rozměry dutin i otvorů pro šrouby jsou dány funkčními požadavky. Není-li konstrukce realizovatelná konkrétní technologií, musí být zvolena jiná technologie bez zásahu do funkčnosti konstrukce.¹

Klasické obloukové svařování nesmí být použito v blízkosti polovodičových součástek kvůli jejich náchylnosti k vysokým teplotám nebo rychlým změnám v intenzitě elektromagnetických polí.¹

Je těžké se vyhnout systému dvojích tolerancí, protože např. v případě hybridního děliče by mělo být tělo v přesné vzdálenosti od víka, aby se vytvořila vzduchová mezera, ale zároveň musí být víko v těsném kontaktu se středovým válcem, což je nezbytné pro funkčnost děliče. Přestože by mělo být víko přitisknuté k bočním stěnám těla, musejí být současně zajištěny přesné pozice otvorů pro montážní šrouby v těle i víku. Centrální

proužek by měl být v určené vzdálenosti od středového válce a zároveň by se měl dotýkat středových kolíků SMA konektorů. ¹

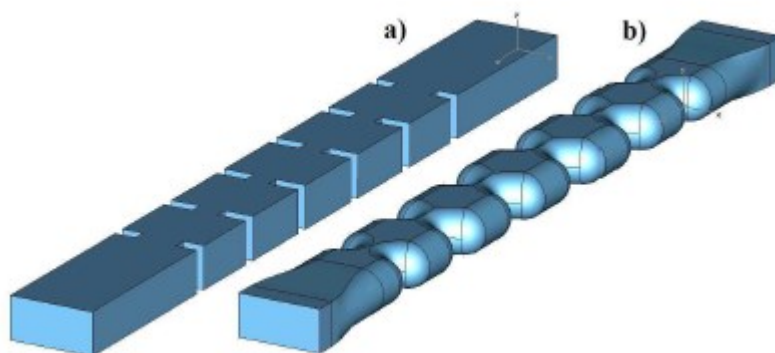


Obr. č. 6 - Prototyp mechanické konstrukce těla čtyř portového 1.1 až 1.8 GHz kruhového hybridního děliče ¹

Celé sestavy mikrovlnných mechanických součástí se většinou skládají z několika různých materiálů, takže je na výkresech vhodné šrafovat oblasti řezu různě podle konkrétního materiálu. Hodně z doplňkových součástí je původně kresleno v USA, kde se nepoužívají metrické jednotky, takže je pro takové součásti doporučeno uvádět rozměry v palcích a v závorkách v milimetrech (platí např. pro koaxiální konektory nebo příruby vlnovodů). ¹

5. První zdokumentovaný experiment

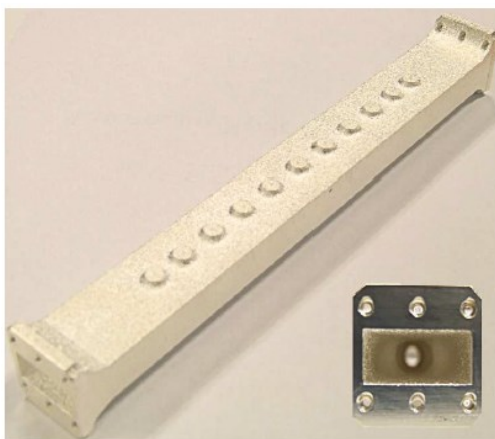
V roce 2009 představili výzkumníci z Evropské vesmírné agentury ve spolupráci s Polytechnickou univerzitou v Kartagéně a se společností Tesat-Spacecom GmbH&Co. KG v rámci grantu ESA-ESTEC první experimentální filtr vyrobený technologií aditivní výroby SLM. Přesněji řečeno byly vyhotoveny dva druhy přímých úzkopásmových filtrů (s aproximovanou funkcí) pátého stupně s šířkou propustnosti 100 MHz pro pracovní frekvenci 11 GHz (tedy od 10950 MHz do 11050 MHz) se zamýšlenou ztrátou do 25 dB. Oba druhy filtrů byly vytvořeny pro shodnou frekvenční odezvu. Zatímco první typ měl konvenční geometrii vnitřních dutin, druhý typ byl vytvořen s větší volností, pro kterou je mimo jiné vhodná právě SLM. Přestože byl pro oba filtry nasimulován Q faktor, pro filtr s nepravoúhlou vnitřní geometrií nemohla být nasimulována celková výtěžnost. Navíc, v té době nemohla být použita úplná volnost v návrhu vnitřní geometrie, proto by druhý typ filtr měl být brán spíše jako ukázka možného než jako ukázka maximálních možností blížících se k teoretickým limitům. V dnešní době již existují nové verze simulačních programů FEKO od Altair HyperWorks nebo IE3D v současné době vyvíjený společností Mentor Graphics, které již při použití dostatečně výkonného HW umožňují simulaci šíření mikrovlnných vln v dutinách a tudíž mohou pomáhat při návrhu tvarově rozmanitějších mikrovlnných filtrů a dalších obdobných součástí.^{1,9}



Obr. č. 7 - První typ filtru (a) představuje klasický přístup a druhý typ (b) přístup s větší tvarovou volností⁹

K Obr. č. 7 by mělo být poznamenáno, že filtr, který je autorovi této práce výchozím vzorem a který se běžně sériově vyrábí v řádu jednotek tisíc kusů ročně je svojí vnitřní tvarovou charakteristikou mezi vyobrazenými typy (a), (b). V případě dalších prototypů by bylo dobré pokusit se přiblížit variantě (b).^{1,9}

Pokud se vrátíme zpět k projektu ESA, výzkumníci použili jako základní materiál hliníkovou slitinu AlSi10Mg (tedy stejnou jako pro náš experimentální demonstrátor 24 GHz filtru), dále Titan stupně 2, a to jak bez úpravy drsnosti povrchu, tak i chemicky leštěný. Filtr z hliníkové slitiny byl postříbřen, avšak ve zprávě není uvedena konkrétní technologie, pouze že bylo postříbření provedeno společností Tesat-Spacecom. Pro každý materiál byl zhotoven filtr s běžnou vnitřní geometrií a filtr s volnější vnitřní geometrií.⁹



Obr. č. 8 - Filtr typu větší volnosti vnitřní geometrie vyrobený z hliníkové slitiny AlSi10Mg⁹

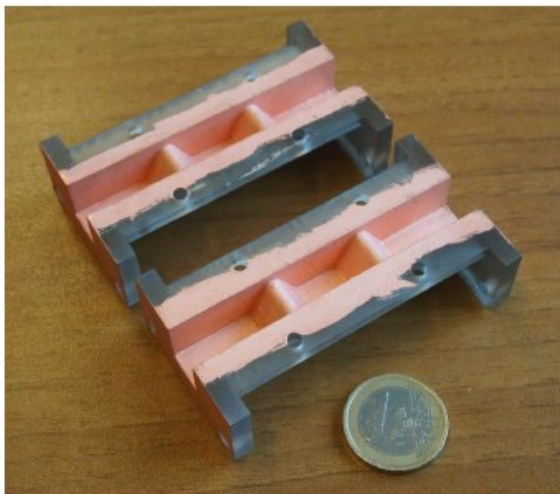
Při simulaci programem μ Wave Wizard byla stanovena geometrická přesnost výroby alespoň na 30 μ m tak, aby byly zajištěny požadované funkční parametry filtru. Nutno poznamenat, že výše uvedený program není k simulaci rozmanitých tvarových dutin a není moc uživatelsky přívětivý. Například nelze importovat do něj model z některého rozšířeného 3D modelovacího programu a modelování přímo v simulačním programu je u tvarově složitějších součástí hodně náročné a nepraktické. Jak si autor této práce ověřil, tyto nešvary přetrvávají i do aktuální verze tohoto programu.^{1,9}

Bylo zjištěno, že Q faktor může být více než 70 %, je-li na hliníkovou slitinu AlSi10Mg jakožto základní materiál nanesen vodivý povlak stříbra. Také bylo zjištěno, že větší stupeň volnosti vnitřní geometrie filtru může oproti běžné geometrii zvětšit Q faktor nejméně o 15 %. Další základní materiály měly Q faktor výrazně nižší, což ale bylo i přepokládáno na základě simulací a teoretických výpočtů.⁹

6. Alternativní použití plastických hmot s metalizací povrchu

Názor autora této práce je takový (hlavně na základě hovoru s dlouholetými vývojáři), že polymery v sériové výrobě není možné pro drtivou většinu mechanických mikrovlnných komponent použít kvůli jejich degradaci v relativně extrémních podmínkách, v jakých jsou mikrovlnná pojítka jakožto hotové výrobky běžně umístěny, ale je nutné tuto možnost v budoucnu studovat. Protože i v ČR nabízí například společnost Bárta&Cihlář potažení nevodivých materiálů vodivou vrstvou stříbra, zabýval se autor této práce i možnostmi řešení v této oblasti. Zajímavá se jeví studie výzkumníků z Univerzity Perugia v Itálii z roku 2017.^{10, 11}

Výzkumníci tvrdí, že se jim galvanicky (elektrolyticky) podařilo nanést vysoce kvalitní povlak mědi na 10 GHz rezonátor vytištěný stereo-litografickou metodou 3D tisku (SLA). Také tvrdí, že je tato metoda dostatečně přesná na to, aby nebyly negativně ovlivněny funkční vlastnosti takto vyrobených mechanických mikrovlnných součástí. Jak již bylo naznačeno výše, výzkumníci se ubírají předpokládatelným směrem, kdy je na podkladní stříbrný inkoust galvanicky nanесena vrstva mědi o něco málo přesahující 10 μm , při čemž tloušťka vrstvy závisí na proudu i době pokovování. Ale pozor, protože platí, že aby mohl být do vnitřní dutiny aplikován měděný nebo jiný povlak elektrolyticky, musí být dovnitř vsunuta elektroda, což může být při rozměrech vlnovodů pro vyšší frekvenční pásma téměř hodinářská práce (více v kapitole o rozměrech a přesnosti). Navíc, pokud je elektroda blíže k některé straně vnitřní dutiny v řádu desítek mikronů, bude rychlost pokovení této bližší strany rychlejší a dojde tak k aplikaci nerovnoměrné vrstvy povlaku. Ale rezonátor není zase nikterak tvarově složitý, proto mohli výzkumníci zvolit elektrolytické pokovení. V této práci budou proto nalezeny a využity jiné způsoby pokovení, což bude rozepsáno v dalších kapitolách.¹¹

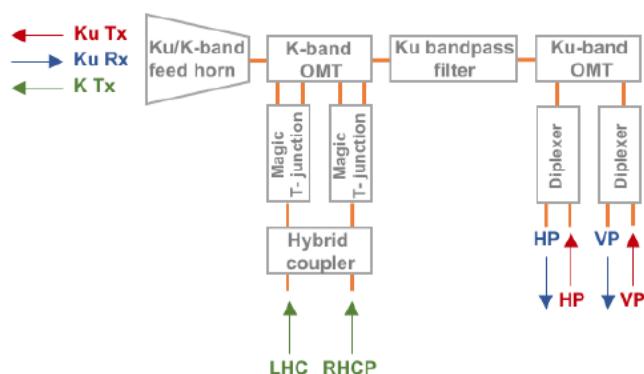


Obr. č. 9 - Dvoudílný demonstrátor 10 GHz rezonátoru s nanesenou vrstvou mědi na stěnách vnitřní dutiny ¹¹

Italští výzkumníci svůj projekt hodnotí úspěšně, protože na dalším prototypu 10 GHz filtru změřily vstupní ztrátu kolem 0.2 dB, což kladou za úspěch, jak metodě 3D tisku SLA, tak i jejich technologii elektrolytického povlakování. Vývojáři mikrovlnných mechanických součástí se musí zabývat i aspekty životnosti, pokud mají brát tuto alternativu, jak ke konvenční výrobě, tak i vůbec ke kovovým slitinám jako základnímu materiálu, v potaz. ¹¹

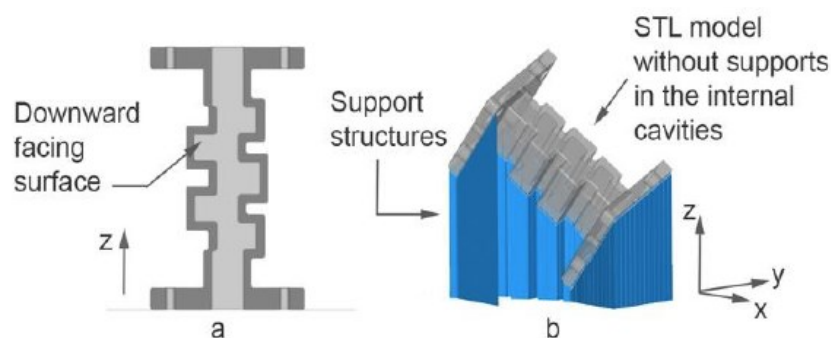
7. Výroba vysoko výkonových mikrovlnných vlnovodů pomocí L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)

V minulém roce provedli výzkumníci z Itálie další experiment na téma výroby mechanických mikrovlnných součástí vyrobených pomocí DMLS (komerční název pro L-PBF), kdy se jednalo o Ku/K pásmové filtry typicky určené pro satelitní komunikaci. Autoři sní o budoucím snížení hmotnosti celé aparatury pomocí aditivní technologie výroby a dokonce i začlenění některých částí přímo do struktury družic. ⁶



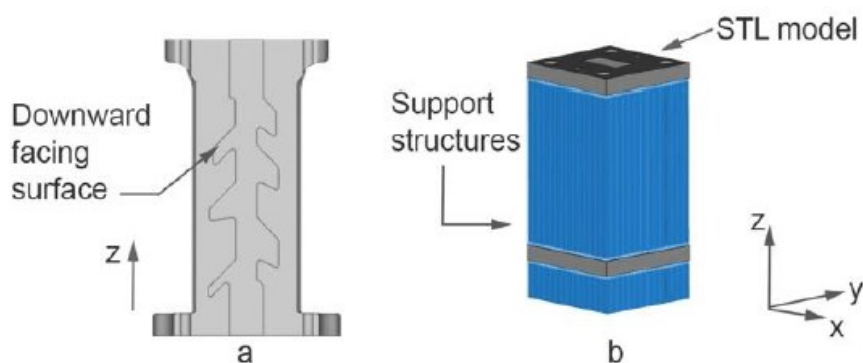
Obr. č. 10 - Blokové schéma Ku/K anténní aparatury ⁶

Autoři chtějí předejít deformacím součástí, vytváření zbytkových napětí nebo hrudek při tisku metodou L-PBF v důsledku koncentrace velkého množství energie, která je při tomto procesu potřebná pro natavení kovových částic. Jsou přesvědčeni, že jim může pomoci správná orientace tisknutých součástí a vhodné rozmístění podpor. Filtr na obrázku níže byl navržen tak, aby splnil požadavky na satelitní komunikaci, přesněji řečeno koeficient odrazu v pásmu propustnosti (12,5 až 15,0 GHz) menší než -30 dB a koeficient propustnosti v odfiltrovaném pásmu (17,5 až 21,2 GHz) menší než -45 dB. První vzorek byl umístěn na pracovní plochu pod úhlem, aby nedošlo k sesunutí horní strany dutiny. Bohužel tato orientace znamenala nejen zvýšení objemu odpadu z podpor, ale také snížení přesnosti jednotlivých rozměrů. ⁶



Obr. č. 11 - Nízko pásmový K/Ku filtr pátého řádu v průřezu (a) a jeho orientace při tisku s podporami zvýrazněnými modře (b) ⁶

Autoři chtěli odbourat tato negativa novým návrhem filtru šestého stupně pro stejné pásmo tak, že ho na pracovní plochu postavili kolmo, jak je vidět na Obr. č. 12. Taktéž navrhli vnitřní geometrii tak, aby stěny jednotlivých zákoutí dutiny nikdy nesvíraly nulový úhel se základní plochou, tedy aby nebyly rovnoběžné s nanášenými vrstvami kovu. ⁶

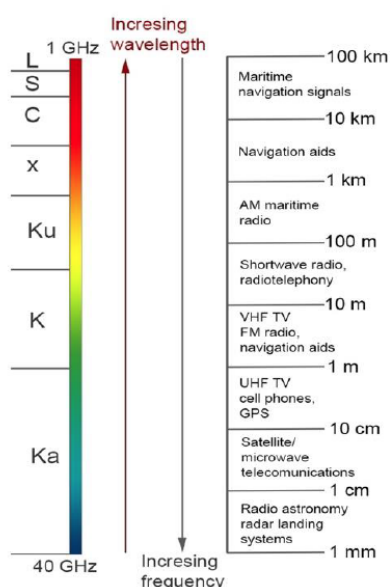


Obr. č. 12 - Nízko-pásmový K/Ku filtr šestého řádu v průřezu (a) a jeho orientace při tisku s podporami zvýrazněnými modře (b) ⁶

Filtry byly vyrobeny z hliníkové slitiny AlSi10Mg na zařízení EOSINT M270 Dual-mode vybavené Ytterbiovým laserem s použitým výkonem 195W a velikostí laserového svazku 100 μm , kdy nebyl použit ochranný plyn. Udávaná tloušťka skenované vrstvy je 30 μm . Podle autorů studie prokázaly oba filtry téměř identické funkční parametry, kdy splnily výše uvedená očekávání. Ke zlepšení vlastností bylo provedeno odsazení paprsku a optimalizace strategie skenování, takže nakonec byla chyba výroby nejvýše 80 μm . Autoři vyrobili ještě několik dalších experimentálních demonstrátorů a nakonec konstatovali, že všechny tři hlavní parametry (návratová ztráta, vstupní ztráta a nepropustnost) vyhovovaly standardům satelitních komunikací a velmi se blížily odhadům na základě teoretických výpočtů. ⁶

8. Rozměry a přesnost mechanických mikrovlnných součástí

V této kapitole jsou velice stručně nastíněny základní rozměry elektromagnetického svazku pro vlnovody, čehož je využito i ve filtrech s tím, že samozřejmě určení vnitřní geometrie je už daleko složitější. Dále je zde stručně vysvětlen tzv. Q faktor a jeho výpočet a popsán vliv výrobních rozměrových nepřesností na funkčnost jednotlivých mikrovlnných mechanických součástí. Obr. č. 13 je zde hlavně proto, že i laikovi názorně ukáže úměru mezi pracovní frekvencí a délkou vlny, která je důležitá při konstruování zmíněných součástí. Určitá pásma, tedy rozsahy frekvencí či vlnových délek mají také svoje označení jedním nebo dvěma písmeny, které jsou používány v literatuře a pro autory odborné literatury je zcela samozřejmé, že čtenář zná tato označení. Na obrázku není zmíněno pásmo E, což je frekvence 70 až 80 GHz, které se v současné době komerčně velmi používá, protože nabízí full duplex přenosovou rychlost přes 2Gb/s (uvedená rychlost platí pro příchozí i odchozí směr), ale v této práci se o něm mluvit nebude, protože přesnost pro mechanické mikrovlnné součásti určené např. pro 80 GHz musí být extrémní v porovnání s nižšími frekvenčními pásmy. To je patrné i z výzkumných projektů, ze kterých byla čerpána motivace pro tuto práci, kde si jejich autoři záměrně volí pro svoje experimenty nižší frekvence buď 10 nebo 11 GHz (což je v této fázi pokroku ale naprosto v pořádku).



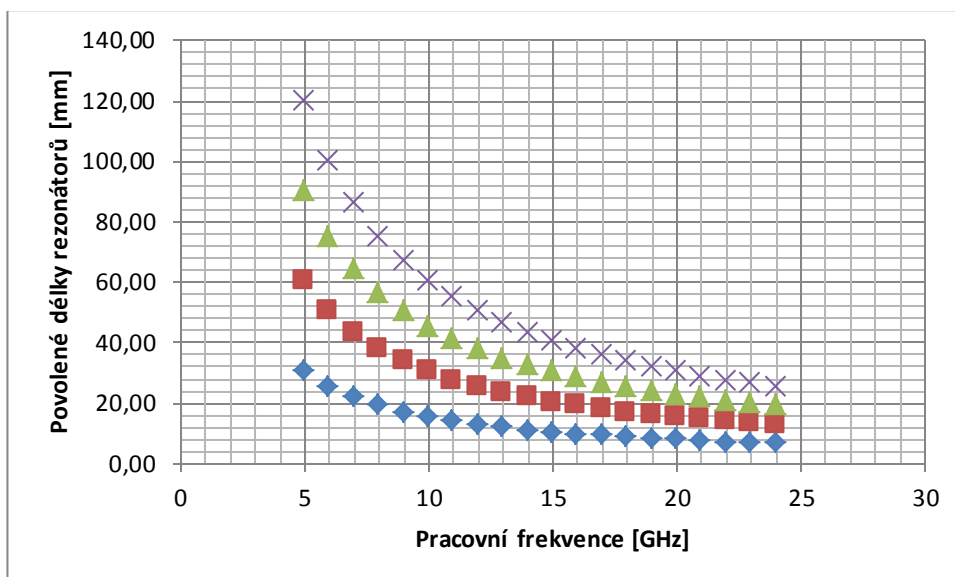
Obr. č. 13 - Úměra mezi frekvencí a vlnovou délkou spolu s názvem pásma, při čemž všechny uvedené pásma vlevo jsou super vysoké frekvence a délka vlny je v milimetrech. Vpravo je pak přehled nižších frekvencí v desítkách Hz až stovkách MHz a u kterých je délka vlny od desítek km po jednotky cm. ⁶

Dutina vedoucí elektromagnetické vlnění by měla mít 4 stěny rovnoběžné se svou osou Z, při čemž každá z nich by měla být ideálně vodivou a rovnou plochou. Mezi každými dvěma sousedními stěnami by měl být pravý úhel. Jedině tak je zajištěn správný režim šíření elektromagnetického vlnění. Například, při svařování součástí z několika plechových destiček mohou sváry v rozích narušit tvar hran v rozích dutiny a indukují nechtěné režimy šíření, které obvykle sníží kvalitativní faktor Q.¹

Například, pokud navrhujeme rezonátor, musí být jeho délka celočíselně dělitelná polovinou délky vlny λ . Kvůli snadnější představě jsou v Tab. č. 1 zobrazeny délky vln pro frekvence zmíněné v této práci a následně jsou zobrazeny v Graf č. 1 některé možné délky rezonátorů v milimetrech (samozřejmě je možno pokračovat na vyšší frekvence).

Frekvence [Délka vlny
1	300,00
2	150,00
3	100,00
4	75,00
5	60,00
6	50,00
7	42,86
8	37,50
9	33,33
10	30,00
11	27,27
12	25,00
13	23,08
14	21,43
15	20,00
16	18,75
17	17,65
18	16,67
19	15,79
20	15,00
21	14,29
22	13,64
23	13,04
24	12,50

Tab. č. 1 - Délky vlny pro frekvence zmíněné v této práci v milimetrech



Graf č. 1 - Některé povolené délky rezonátorů pracujících v příslušné frekvenci

Vlnová délka je při konstruování důležitá a některé zásady se podle ní přímo odvíjejí. Například, pokud mají být těsnicí RF požadavky přísné a součást je smontována z několika částí, měly by být montážní šrouby ve vzdálenosti nejvýše $\lambda/32$ vlnové délky od sebe. ¹

Nyní je třeba zmínit, že režim šíření TE_{10} má jeden lalok siločár elektrického pole s osou kolmou k delší straně průřezu obdélníkového vlnovodu **a**, a rovnoběžnou se stranou **b**. Naproti tomu např. režim šíření TE_{01} má jeden lalok siločár elektrického pole s osou rovnoběžnou se stranou **a**, a kolmou se stranou **b**. Jednotlivé režimy se od sebe liší frekvencí useknutí, pod kterou režim nedokáže šířit vlnění, což je zjednodušeně řečeno dáno příliš dlouhou vlnovou délkou λ , které neumožní vměstnat tolik laloků siločár elektrického pole do vlnovodu. ¹²

Pokud jsou určovány minimální rozměry vlnovodu pro určitou frekvenci nebo naopak pro určité rozměry frekvence odseknutí (pod tuto frekvenci není žádné šíření), je vycházeno ze vztahu:

$$f_{c,mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (\text{č. 1})$$

kde μ je permeabilita [$H \cdot m^{-1}$], ϵ je permitivita [$F \cdot m^{-1}$], a resp. b je šířka resp. výška obdélníkového vlnovodu [m] a m a n jsou konstanty, které použity k označení režimu šíření. ¹

Je-li režim šíření TE_{10} , je možné vztah zjednodušit do podoby:

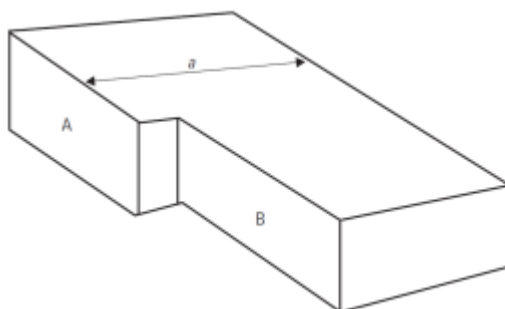
$$f_c = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{č. 2})$$

kde f_c je výsledná frekvence [Hz].¹

Přestože v obdélníkovém vlnovodu nejsou žádná výrazná napětí nebo proudy, pro režim šíření TE_{10} můžeme určit impedanci porovnáním elektrického a magnetického pole podle vztahu:

$$Z = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (\text{č. 3})$$

kde μ je permeabilita [$H \cdot m^{-1}$], ϵ je permitivita [$F \cdot m^{-1}$], λ je délka vlny [m], a je šířka průřezu obdélníkového vlnovodu [m], při čemž $\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ je pro vlnovody ve kterých je vzduch (všechny běžné případy) rovno přibližně 377Ω .^{1, 14, 15}



Obr. č. 14 - V ukázkovém příkladu vlnovodu je výrobní nepřesnost, která zapříčiní změnu rozměru a mezi plochami A, B¹

Je-li v ukázkovém příkladu rozdíl v rozměru a mezi úseky A, B roven $0,0005m$, je nutné spočítat impedanci obou úseků, kdy pracovní frekvence je 15 GHz tj. délka vlny je $0,02m$, délka rozměru a_A je $0.0195m$ a délka rozměru a_B je $0.0185m$, takže:

$$Z_A = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,02}{2 \cdot 0,0195}\right)^2}} = 439,140\Omega \quad (\text{č. 4})$$

$$Z_B = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,02}{2 \cdot 0,0190}\right)^2}} = 443,379\Omega \quad (\text{č. 5})$$

Zanedbáme-li ostatní případné tvarové a rozměrové nedokonalosti uvažovaného vlnovodu, můžeme spočítat součinitel odrazu napětí podle vztahu:

$$\rho = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \quad (\text{č. 6})$$

$$\rho = \frac{443,379 - 439,140}{443,379 + 439,140} = 0,0048 \quad (\text{č. 7})$$

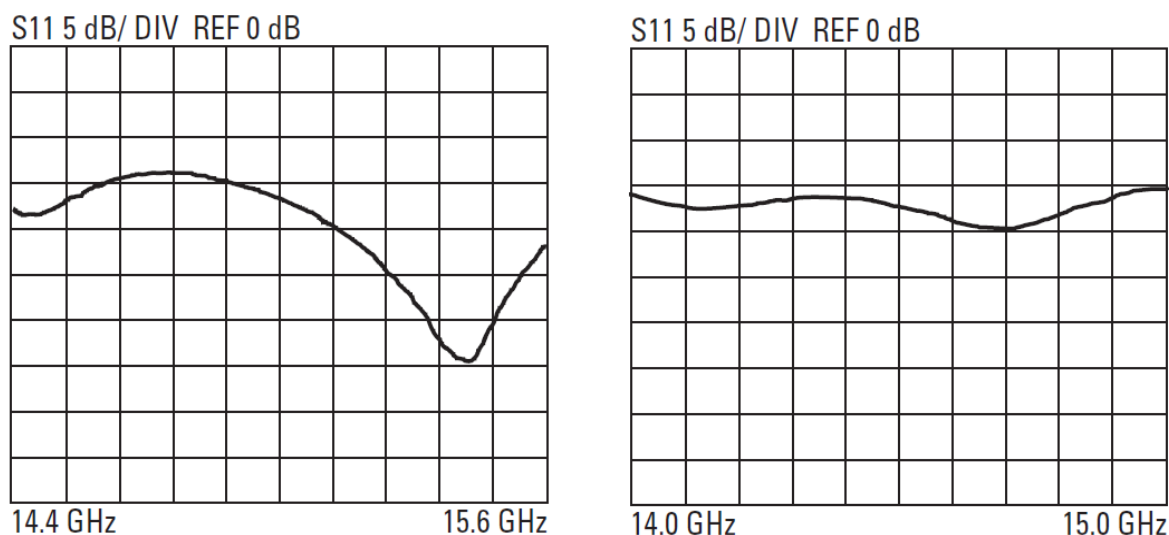
Tato hodnota může být prezentována ve formě návratové ztráty 22 dB, kdy limit pro vysoce kvalitní mikrovlnné součásti je 40 dB. Pokud bylo nebo bude v referovaných projektech jiných autorů použito označení S_{11} pro amplitudu parametru rozptylu, její skalární složka říká, jak velká je amplituda signálu odraženého od uvedené součásti. Pokud se S_{11} blíží k 0 neboli je rovna několik desítek záporných dB, odraz je zanedbatelný (což je pro konstruktéra součásti dobrá zpráva).^{1, 14, 15}

Má-li být určen kvalitativní faktor Q např. pro rezonátor, vychází se ze vztahů:

$$Q = \frac{\omega}{2 \cdot R} * \frac{X}{\omega} \quad (\text{č. 8}) \quad Z_{vstup} = R + jX \quad (\text{č. 9}) \quad Q = \frac{X}{2 \cdot R} \quad (\text{č. 10})$$

kde ω je úhlová rychlost (která je vypuštěna), X je imaginární část vstupní impedance a R je její reálná část.¹

Pro příklad, zatímco průmyslový výrobek má použitelnou šířku pásma 1 GHz, je ruční konstrukce výrazně horší. Horní strana grafu představuje dokonalou odrazivost součásti. Každý dílek představuje jednu desetinu příkonu, která je odražena nazpět.¹



Obr. č. 15 - Závislost návratové ztráty na frekvenci, kdy vlevo je ruční konstrukce, zatímco vpravo je průmyslový výrobek ¹

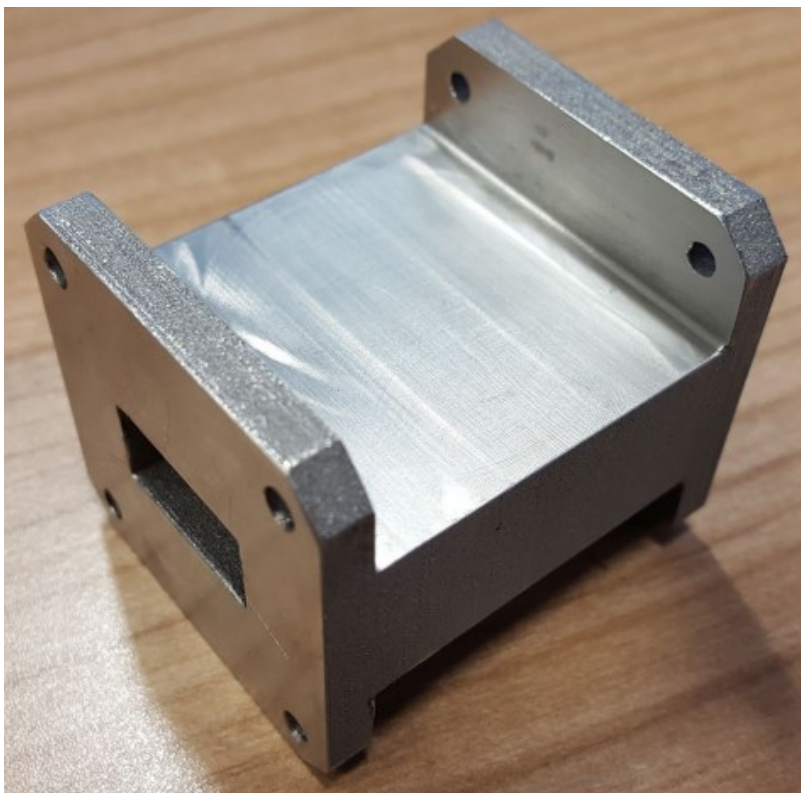
V Tab. č. 2 je patrný vztah mezi frekvenčním rozsahem a požadovanou tolerancí drsnosti pro běžné případy, dále bude spočítán vzorový případ pro tvarovou nerovnost vlnovodu, kdy rozměr jedné vnitřní hrany dutiny nebude stejný jako rozměr druhé protilehlé hrany dutiny.

Frequency (GHz)	Surface Roughness	Tolerance Grade
300–600	0.8 μm	IT5
150–300	1.6 μm	IT6
75–150	3.2 μm	IT7
35–75	6.4 μm	IT8
15–35	12.8 μm	IT9–10

Tab. č. 2 - Ukazuje vztah mezi frekvenčním rozsahem a požadovanou tolerancí drsnosti, kdy s rostoucí pracovní frekvencí musí být požadavek na drsnost povrchu přísnější ¹

9. Experimentální výroba průchodky pro 11 GHz z nerezové oceli 316L

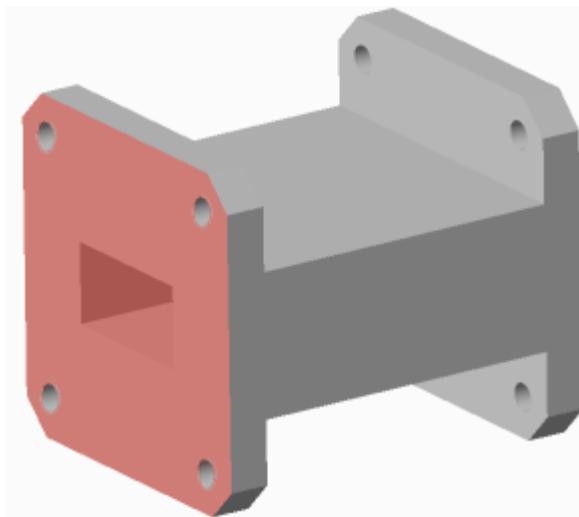
Konstrukce konvenčně vyráběné průchodky byla upravena tak, že byly odstraněny spojovací šrouby, které spojovaly dvě části průchodky k sobě (na obrázku by byla průchodka rozdělena vodorovnou rovinou přesně v polovině obdélníkové dutiny, kdy by tato rovina byla rovnoběžná s viditelnou vybroušenou rovinou). Jiné parametry nebyly upravovány, otvory pro uchycovací šrouby byly ponechány bez závitů jako v původním řešení. Velikost dutiny vedoucí elektromagnetické vlnění je 19.0x10.0 mm, což je spočtená šířka a výška průřezu pro frekvenci 11 GHz, aby nebyly „useknuty“ nosné frekvence.



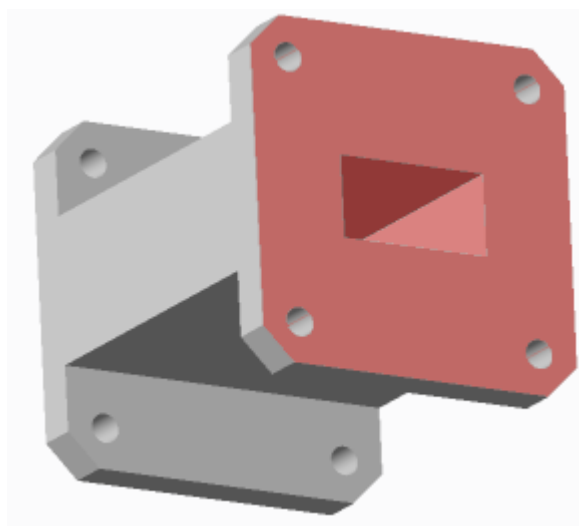
Obr. č. 16 - Průchodka pro 10 GHz vyrobená z nerezové oceli 316L po obrobení na stranách s podporami

U této průchodky se nepředpokládají vynikající elektrické charakteristiky materiálu, jde spíše o to vyzkoušet přesnost rozměrů a drsnost dále neupraveného povrchu uvnitř dutiny u metody SLM pro takovouto aplikaci, což bude ověřeno následným měřením a porovnáním s konvenčně vyrobenou průchodkou. Autor této práce se ale bude dále zabývat možnostmi, jak zmenšit drsnost a nerovnosti povrchu, případně nanést na povrch elektricky vodivou vrstvu mědi či stříbra, protože je ocel 316L dobrým materiálem pro

extrémní prostředí a u některých aplikací by se mohly projevit výhody vůči hliníkovým slitinám apod. Na obrázku jsou zvýrazněny funkční plochy, při čemž záleží kromě vnitřní dutiny i na plochách, které jsou přišroubovány k přírubám sousedních součástí v technologickém řetězci. Na Obr. č. 17 a Obr. č. 18 je součást sice vidět jen z přední strany, ale pohled na druhou stranu je stejný a funkční plochy jsou taktéž stejné.



Obr. č. 17 - Horní pohled na model 11 GHz průchodky vymodelované v PTC Creo Parametric 3.0, na níž jsou červeně vyznačeny funkční plochy



Obr. č. 18 - Spodní pohled na model 11 GHz průchodky vymodelované v PTC Creo Parametric 3.0, na níž jsou červeně vyznačeny funkční plochy

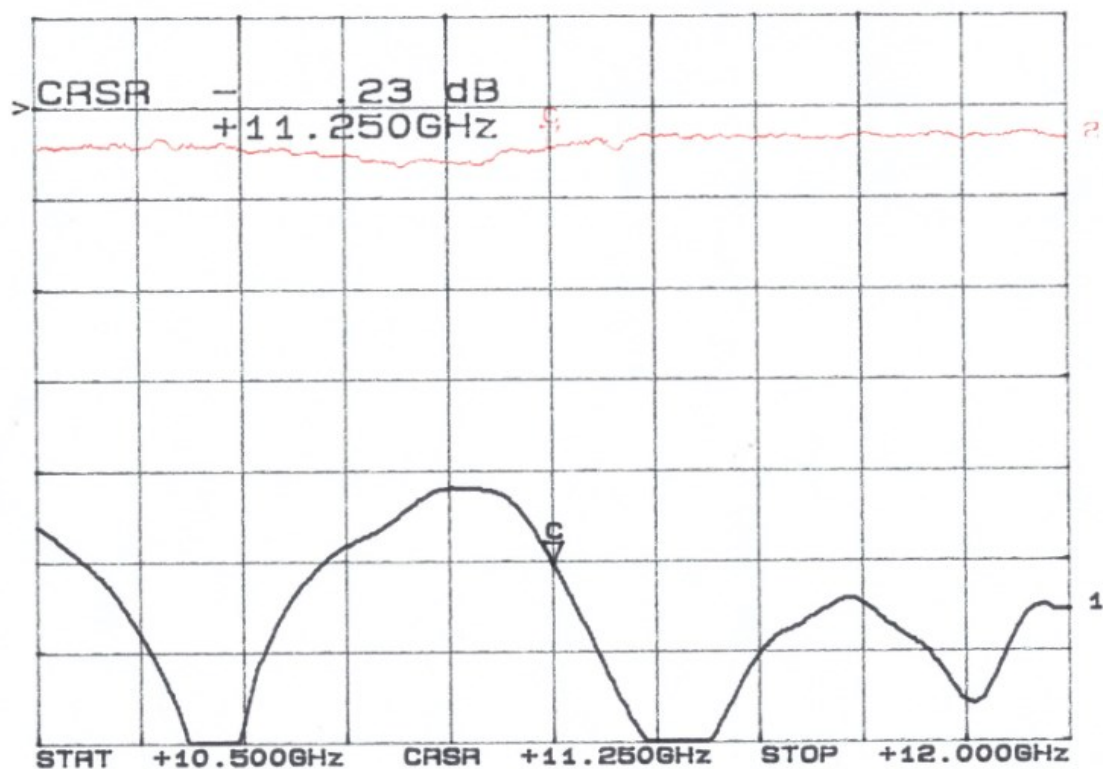
10. Měření průchodky pro 11 GHz na síťovém analyzátoru

K ověření funkčních vlastností byla 11 GHz průchodka změřena na síťovém analyzátoru, kdy bylo cílem zjistit průchozí útlum S_{21} a impedanční přizpůsobení S_{11} . Síťový analyzátor pracuje jako zařízení zjišťující 4 přenosové parametry libovolné obvodové struktury. Parametr S_{21} představuje zesílení nebo útlum v dopředném směru při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Parametr S_{11} je impedanční přizpůsobení neboli vstupní koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Parametr S_{12} je zpětný přenosový koeficient při vstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Parametr S_{22} je výstupní koeficient odrazu při vstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Síťový analyzátor pracuje tak, že se pomocí vysoko-frekvenčního generátoru zjišťuje amplituda jednotlivých parametrů. Měření jednotlivých veličin probíhá v diskretních bodech po krocích, které se parametricky nastaví na uživatelském rozhraní síťového analyzátoru. Následující protokol z měření byl vytisknut na tiskovém zařízení, které je připojeno přímo k síťovému analyzátoru.^{14,15}

Z výsledku měření je patrné, že parametr S_{21} se v měřeném frekvenčním rozsahu pohybuje mezi -0.2 až -0.3 dB, čímž téměř splňuje požadavky pro aplikaci v mikrovlnných zařízeních. V dalších kapitolách je však diskutováno, jak zlepšení drsnosti povrchu funkčních ploch, tak i případné nanesení optimální elektricky vodivé vrstvy v podobě povrchové úpravy, která by zlepšila vlastnosti průchodky tak, aby mohla být směle používána v telekomunikačním zařízení. Vzhledem k povaze křivky parametru S_{11} lze konstatovat, že lze průchodku použít v pásmu 11 GHz.

CH1: A/R-M - 25.12 dB
5.0 dB/ REF - .00 dB

CH2: B/R-M - .23 dB
.5 dB REF - .00 dB



Obr. č. 19 - Protokol o měření, kde je v horní části grafu zobrazena křivka parametru S_{21} (červeně) a ve spodní části grafu křivka parametru S_{11} (černě), bod zápichu je označen trojúhelníčkem a písmenem C. Pro S_{11} je měřítko 5 dB, kde je nulová hladina odznačena písmeny CRSR a šipkou doprava. Pro S_{21} platí stejná nulová hladina a měřítko je 0.5 dB.

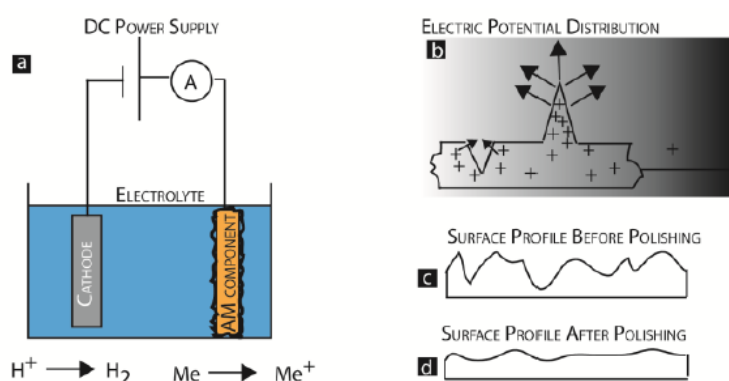
11. Elektrolytické leštění nerezové oceli 316L

Nedávná americká studie z roku 2018 se zabývala elektrolytickým leštěním oceli 316L s obsahem uhlíku nad 6 % u součástí vyhotovených aditivní technologií výroby a výzkumníci konstatovali dramatické zlepšení drsnosti povrchu, kdy po odebrání téměř 250 μm materiálu došlo ke snížení drsnosti pod 0.1 μm Ra, což údajně dodalo oceli jasný lesk.

7

Motivací autorů studie bylo ovšem zlepšit vlastnosti povrchu oceli 316L aditivně vyrobených součástí s velkou tvarovou složitostí, tam kde nelze aplikovat mechanické leštění, a protože příliš hrubý povrch je náchylný k únavovému namáhání nebo silám působícím za vysokých teplot. Motivace této práce je sice pro aplikaci elektrolytického leštění jiná, nicméně budou výsledky studie podrobněji rozebrány, stejně jako postup autorů studie při této povrchové úpravě.

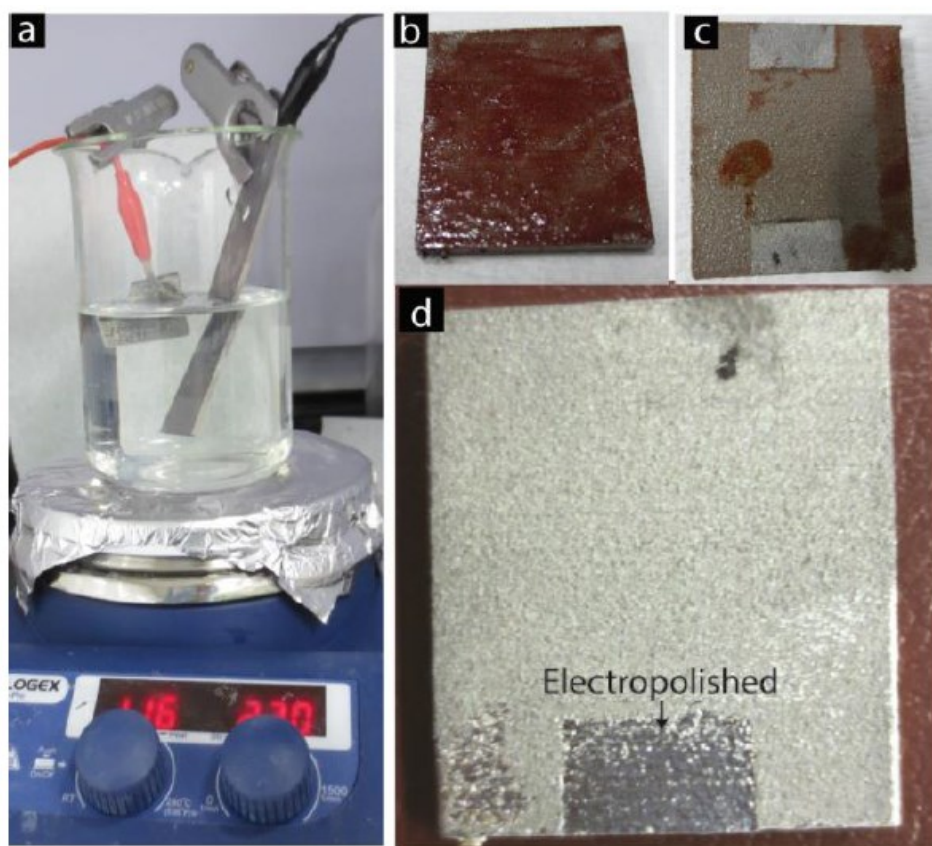
Elektrolytické leštění probíhá na povrchu součásti, která je ponořena v kyselinovém elektrolytu, a naproti němuž je katoda. Samotná součást zastává roli anody, při čemž je spolu s katodou připojena ke zdroji stejnosměrného proudu. Účinnost celého procesu závisí na teplotě, míchání, složení elektrolytu a době leštění. Testovací součást byla vytištěna z kovového prášku na zařízení EOSINT metodou DLS při tloušťce vrstvy přibližně 20 μm . Proudová hustota během experimentu byla nastavena pevně na $80\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$.⁷



Obr. č. 20 - Zařízení pro elektro-lytické leštění (a), koncentrace elektrického pole kolem výrůstků a prohlubní v leštěném materiálu, rozdíl mezi povrchem před (c) a po (d) leštění⁷

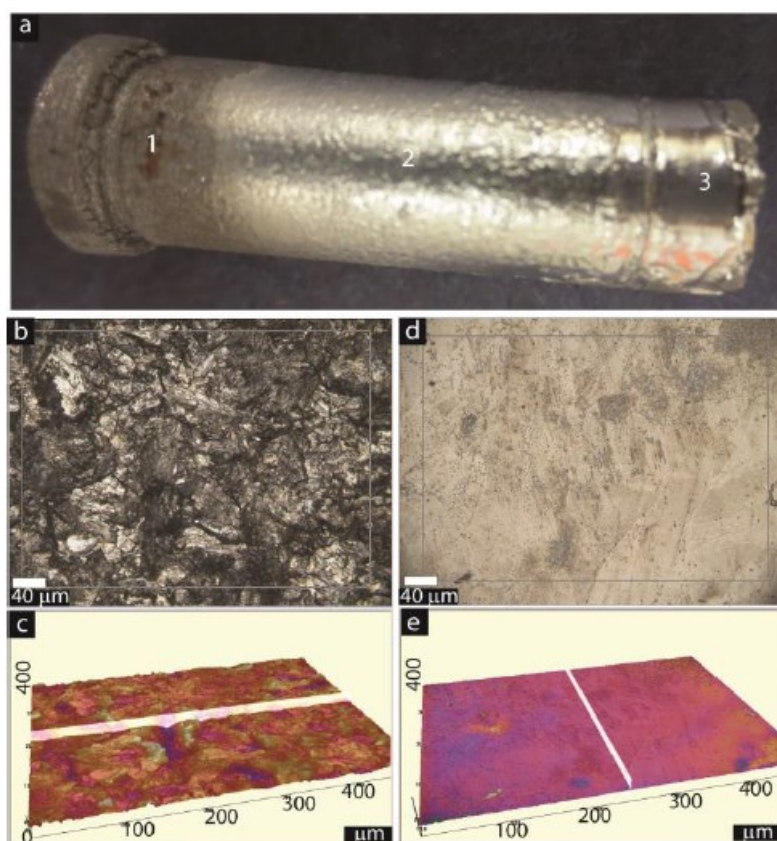
Zajímavé je použití magnetického míchátko na obrázku níže, ruční míchání by bylo při představených parametrech experimentů nemožné. Na povrch součásti byl nanesen odolný ochranný povlak, který zabránil vyleštění povrchu. V něm byla rozpuštěna plocha o velikosti cca 0.5 cm^2 . Bylo tedy možné porovnat vyleštěný a nevyleštěný povrch na stejné

součástí. Jako elektrolyt byla použita dobře známá kombinace kyseliny sírové a fosforečné, při čemž byly vyzkoušeny tři různé poměry, aby bylo zjištěno, který je nejúčinnější.⁷



Obr. č. 21 - Aparatura pro elektro-lytické leštění (a), nanášení ochranného laku (b), ponechání míst bez ochranného laku (c) a vzorek s vyznačeným elektro-lytický vyleštěným místem (d)⁷

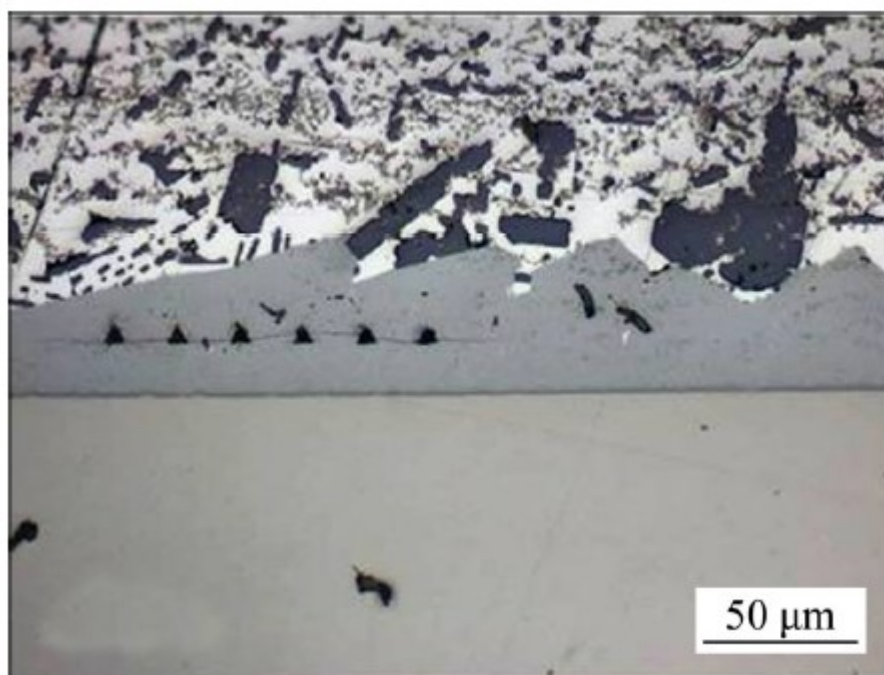
Také bylo s úspěchem vyzkoušeno leštění cylindrické součásti, a to stejným způsobem jako deskovité součásti. Výzkumníci taktéž zkoušeli leštit součásti s vnitřními povrchy, ale úspěšní byly pouze u těch součástí, které umožnily vložení elektrody dovnitř dutiny, jejíž povrch má být leštěn. Tento fakt je autorovi této práce dobře znám, protože platí obecně pro galvanické povrchové úpravy, a proto jsou později v práci použity bezproudé chemické úpravy. Nutno dodat, že chemické bezproudé leštění nerezové oceli není prakticky možné. Výzkumníci dále zjistili s pomocí Taguchiho analytické metody, že nejvíce závisí na teplotě, o něco méně na míchání a nejméně na době leštění. Také byly nalezeny optimální hodnoty procesu a složení elektrolytu, a sice 41 g roztoku 85% kyseliny fosforečné a 45 g roztoku 98% kyseliny sírové, teplota 150 °C, míchání rychlostí 200 otáček za minutu a doba leštění 5 minut. Pro cylindrickou součást byla ale použita delší doba 10 minut, dobu výzkumníci doporučili přizpůsobovat tvarovým složitostem leštěné součásti.⁷



Obr. č. 22 - Cylindrická součást vyhotovená technologií aditivní výroby (a), na níž je patrný nevyleštěný (1) a vyleštěný (2), (3) povrch; dále pohled optickým mikroskopem na nevyleštěnou část (b) a její 3D perspektiva (c); a nakonec pohled optickým mikroskopem na vyleštěnou část (d) a její 3D perspektiva (e) ⁷

12. Možný způsob potažení nerezové oceli 316L hliníkem

V minulém roce se výzkumníci z Číny a Pákistánu pokusily omezit zánětlivé účinky oceli 316L použité při použití na výrobu implantátů. Tento experiment je zajímavý, protože byla stejná ocel, jaká je použita na výrobu 10 GHz průchodky v této práci, potažena hliníkovým povlakem ponorem do horké lázně za teploty 765 °C po dobu 2 minut. Polovina vzorků byla také ošetřena difuzí v Mufflově peci za teploty 550 °C po dobu 4 hodiny.⁸



Obr. č. 23 - Bližší pohled na vzorek 15% Al-Si bez difuze⁸

Motivace autorů byla v tom, že více než 90 % selhání implantací, kdy je implantát vyroben z oceli 316L, selže kvůli místnímu napadení korozí, přičemž s dobou od provedení implantace toto nebezpečí výrazně narůstá. Autoři se rozhodli potáhnout testované součásti v roztavené lázni ze slitiny hliníku a 11 %, 13 % resp. 15 % křemíku, která vytvoří bez-nikelnaté mezi kovové vrstvy na povrchu nerezové oceli, při čemž má tento povlak dobrou přilnavost. Pro experiment výzkumníci zakoupili komerčně dostupné 2 mm tlusté pláty z oceli 316L, přičemž přesné složení této oceli je uvedeno v Tab. č. 3.⁸

Cr	C	P	Fe	Mn
16.7	0.025	0.065	70.3	7.44
Mo	Ni	Cu	S	
2.28	9.9	0.29	0.062	

Tab. č. 3 - Složení použité oceli 316L z jednotlivých prvků v hmotnostních procentech ⁸

Z nakoupených plátů oceli byly vystříhány vzorky o velikosti 15.0x30.0 mm, které byly nejprve namořeny v kyselině dusičné a odmaštěny v etanolu. Po té byly předežhřáty na 700 °C v bez-oxidovém prostředí, což omezilo efekt silného přirozeného oxidování. Byly namíchány tři lázně s různým obsahem křemíku a polovina vzorků byla difúzně ošetřena. Byla naměřena velká tvrdost 11.4GPa v mezi-kovové oblasti, což je způsobeno difúzí slitiny Al-Si ke stopovým prvkům, což vede k tvorbě mezi-kovových sloučenin. Nejsilnější tloušťka vrstvy byla dosažena při 15 % Si, jak je patrné z Tab. č. 4. ⁸

State	Coating thickness/ μm		
	11% Al-Si	13% Al-Si	15% Al-Si
Non-diffused	105.11	217.52	270.78
Diffused	86.51	98.87	203.82

Tab. č. 4 - Tloušťka nanesené vrstvy při určitém obsahu křemíku ⁸

13. Experimentální výroba filtru pro 24 GHz z hliníkové slitiny AlSi10Mg

Protože se v podmínkách ČR v nějakém komerčním provozu nepodařilo zajistit alespoň chemické leštění nerezové oceli a bylo třeba vyzkoušet funkčnost složitějších mechanických mikrovlnných součástí, bylo rozhodnuto, že bude další součást vyrobena z hliníkové slitiny z důvodů:

- možnost případného chemického vyleštění povrchu,
- možnost nanést vodivou vrstvu mědi, stříbra, případně jinou galvanickou nebo bezproudou povrchovou úpravu,
- dobrá vodivost hliníkové slitiny - po případné pasivaci by nemusela být prováděna povrchová úprava.

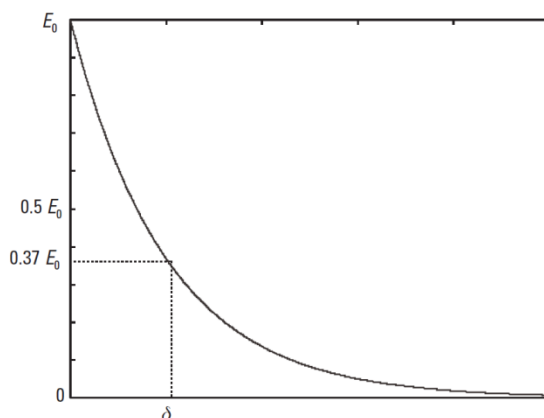
Byl vyroben filtr sloužící jako část diplexeru Rx filtrující přijímanou frekvenci pro pracovní frekvenci 24 GHz, který byl oproti konvenčně vyráběné verzi maximálně odlehčen, byly odstraněny otvory pro nepotřebné šrouby (montáž z několika kusů), avšak vnitřní geometrie nebyla nijak upravována, aby bylo možné porovnat funkční parametry nově vyrobeného mikrovlnného filtru a nebylo nutné provádět složité počítačové simulace.



Obr. č. 24 - Část diplexeru pro oddělení přijímané frekvence Rx pracující na frekvenci 24 GHz bezprostředně po vyrobě ještě bez povrchové úpravy

14. Výpočet penetrační hloubky podle druhu materiálu

Stejně jako neexistuje ideální izolátor, neexistuje ani ideální vodič. Pokud při výrobě mechanických mikrovlnných komponent používáme základní materiál s ne úplně dobrými fyzikálními vlastnostmi, můžeme aplikovat povlak z vhodného materiálu. Abychom věděli, jaká tloušťka vrstvy má být nanесena, musíme znát, do jaké hloubky pronikne elektromagnetické vlnění. Z Maxwellových rovnic lze odvodit tzv. penetrační hloubka, která určuje hloubku v materiálu, ve které je elektrické pole utlumeno na asi 37 % jeho původní intenzity.



Graf č. 2 - Obrázek znázorňuje průnik elektromagnetického vlnění do materiálu, kdy ve vzdálenosti δ je tzv. penetrační hloubka, kdy je amplituda zmenšena o $1/e$ neboli cca 8.7 dB oproti původní hodnotě ¹

Nyní bude následovat jednoduché odvození vzorce pro výpočet penetrační hloubky a výpočty hodnot pro běžně používané materiály:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{č. 9}) \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (\text{č. 11})$$

kde f je frekvence v Hz, ω je úhlová frekvence v $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, δ je penetrační hloubka v metrech, μ je permeabilita materiálu v $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ a σ je elektrická vodivost v $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. ¹

Permeabilita ve vakuu je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ a skutečná elektrická vodivost je $\sigma = 5,82 \cdot 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Vytvoříme výsledný vzorec, do kterého už budeme moct dosazovat pouze relativní elektrickou vodivost σ_r a relativní permeabilitu μ_r použitého materiálu a pracovní frekvenci f :

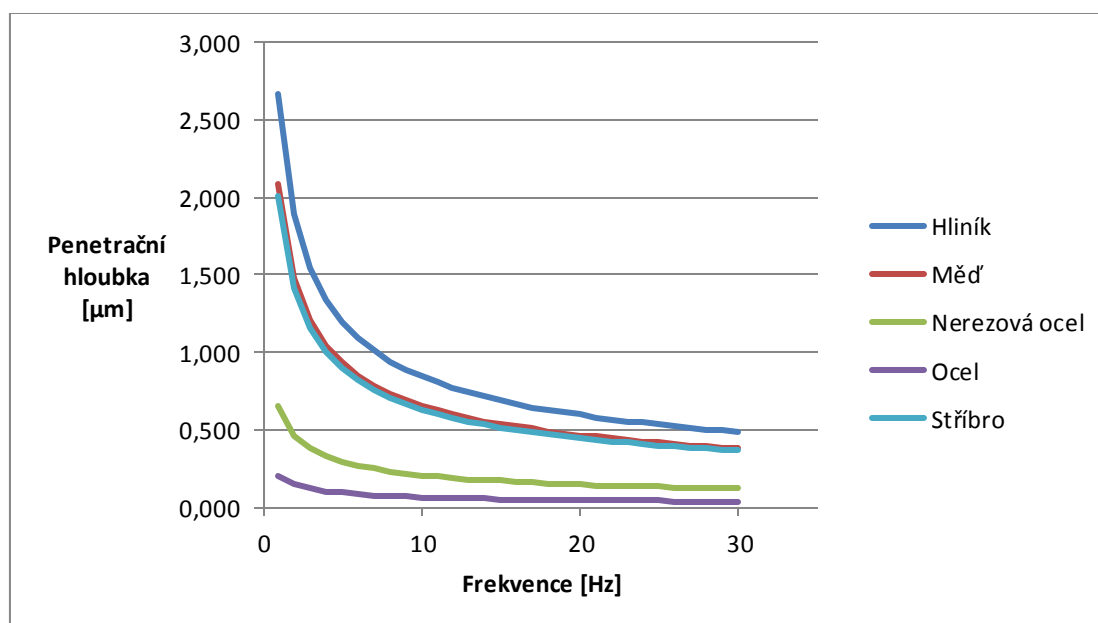
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f * 4\pi * 10^{-7} * \mu_r * 5,82 * 10^7 * \sigma_r}} \quad (\text{č. 12})$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{229.764 * f * \mu_r * \sigma_r}} \quad (\text{č.13})$$

V Tab. č. 5 jsou vypsané hodnoty relativní elektrické vodivosti a relativní permeability pro běžně používané kovové materiály a v grafu níže jsou vyobrazeny hodnoty pro frekvence mezi 1 GHz až 35 GHz.

Materiál	Relativní vodivost	Relativní permeabilita
Hliník	0,61	1,00002
Měď	1,00	0,999991
Nerezová ocel	0,02	500
Ocel	0,10	1000
Stříbro	1,08	0,9998

Tab. č. 5 - Hodnoty relativní elektrické vodivosti v Siemensch na metr a relativní permeability v Henry na metr pro vybrané kovové materiály ¹

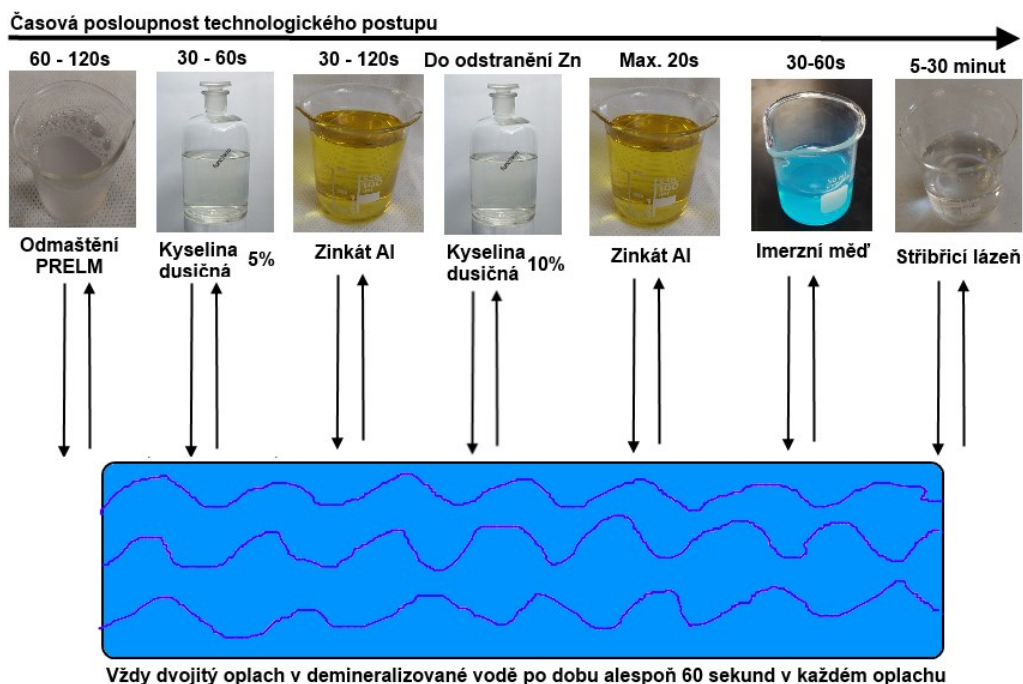


Graf č. 3 - Graf závislosti penetrační hloubky na pracovní frekvenci pro běžně používané kovové materiály

15. Postup při chemickém stříbření

S ohledem na skutečnosti zmíněné v předchozích kapitolách bylo rozhodnuto demonstrátor filtru pro 24 GHz chemicky postříbřit vrstvou 4-5 mikronů na mezivrstvu imerzní mědi a mezivrstvě zinkátu Al, kdy byly použity již připravené roztoky od společnosti FUNCHEM. Výjimkou byla demineralizovaná voda, která byla natočena v místní demineralizační stanici spřízněné galvanovny. Také byla využita aparatura galvanovny a rovněž i zkušenosti vedoucího, na jejichž základě je možné učinit některé předpoklady v budoucích kapitolách této práce ohledně použití chemických povrchových úprav na součásti vyrobené technologií SLM.

Je-li součást vyrobena z hliníkové slitiny AlSi10Mg, je nutné použít roztok zinkát Al, protože není možné pokovit hliník nebo jeho slitiny přímo imerzní mědí. Mezi každými dvěma operacemi následuje dvojitý oplach v demineralizované vodě, kdy první oplach fyzicky opláchne přebytečnou kapalinu z předchozí lázně a druhý oplach neutralizuje zbytky sloučenin na povrchu součásti. Není možné použít běžnou vodu z vodovodu bez její úpravy, je nutné použít destilovanou nebo demineralizovanou vodu. Prvně je součást dokonale odmaštěna v roztoku PRELM při teplotě 45 až 55 °C po dobu 60 až 120 sekund (nebo při pokojové teplotě 2 až 3 minuty, kdy nebyl neprokázán žádný negativní vliv na kvalitu následného pokovení), kdy odmaštění musí přecházet jakékoliv galvanické povrchové úpravě, nenásleduje-li bezprostředně po jiné galvanické povrchové úpravě. Navíc, PRELM dobře aktivuje hliník či dural, což je nezbytné pro další postup. Součást je následně ponořena do 3 až 5% kyseliny dusičné (v našem případě byl rozředěn 5% roztok kyseliny dusičné s demineralizovanou vodou v poměru 1:1) na 30 až 60 sekund (v našem případě byla zvolena střední doba 60 sekund pro dokonalejší vyleštění), kde dojde k vyleštění povrchu hliníkové součásti.³



Obr. č. 25 - Názorné schéma technologického postupu při chemickém stříbření se všemi předúpravami a mezivrstvami

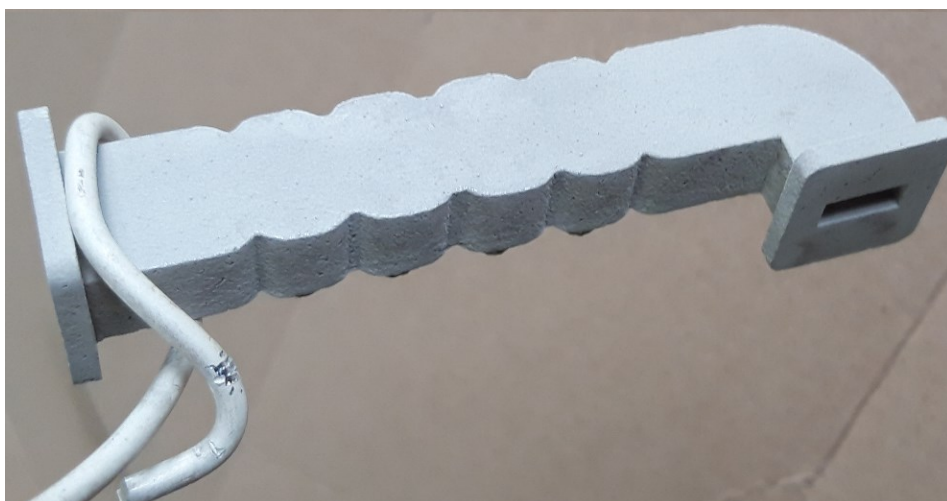
Následně se součást ponoří do zinkátové lázně na 30 až 120 sekund (v našem případě zvolena střední hodnota dle tvaru součásti), která má pokojovou teplotu. Následuje ponoření opět do kyseliny dusičné, tentokrát však 5 až 10% (v našem experimentu byl 10% roztok namíchaný přímo dodavatelem), a součást vytáhneme až po úplném stažení zinku (v našem experimentu se jednalo o časový interval několika sekund) a opět ji ponoříme do zinkátu. Tentokrát necháme součást ponořenou pouze max. na 20 sekund (reálně 15 až 20 sekund podle konkrétní součásti) a kde dojde k vyloučení 0.5 až 2 μm zinku na povrchu součásti, po čemž už je možno na takto připravený povrch aplikovat měď, cín, elektrolytický či chemický nikl, elektrolytický zinek apod. Následně je součást ponořena do imerzní mědi na 30 až 60 sekund, kdy je možno pozorovat zabarvení dočervena už po nanesení vrstvy zlomku mikronu. Imerzní měď je používána jako mezivrstva při chemickém cínování ocelových dílů nebo pro snížení elektrického odporu na povrchu studené chemické mědi při elektrolytickém procesu.³



Obr. č. 26 - Součást po nanesení imerzní mědi a následném dvojitém oplachu vyfocená bezprostředně před chemickým stříbřením

V tomto případě však bude následovat chemické stříbření, které je možno normálně provádět pouze na součástech ze slitin mědi či z nelegovaných ocelí, například na deskách plošných spojů. Chemické stříbření je nanášeno rychlostí $0.2 \mu\text{m}$ za minutu a podle předchozích výpočtů je pro funkci elektricky vodivé vrstvičky důležité nanést alespoň $1 \mu\text{m}$ stříbra. Pro silnější a odolnější vrstvu byla součást v lázni ponechána cca 30 minut, aby byla dosažena vrstva alespoň $6 \mu\text{m}$.³

Jak je patrné z následující fotografie, součást se neleskne, na což by byla potřeba souvislá vrstva alespoň $25 \mu\text{m}$, což ale není potřebné pro funkčnost povrchové vrstvy z hlediska elektrické vodivosti, a jednalo by se spíše o vizuální prezentaci postříbřené součásti vytvořené aditivní technologií SLM. Přestože by měl autor této práce o takovouto dobře patrnou prezentaci chemické stříbření zájem, přítomní odborníci na chemické povrchové úpravy nedoporučili překročit vrstvu $6 \mu\text{m}$, neboť je základním materiálem hliníková slitina AlSi10Mg a celý proces pokovení byl už tak náročný, kdy obsahoval vlastně tři bezprostředně následující povlakované vrstvy – zinkát, imerzní měď a stříbro.

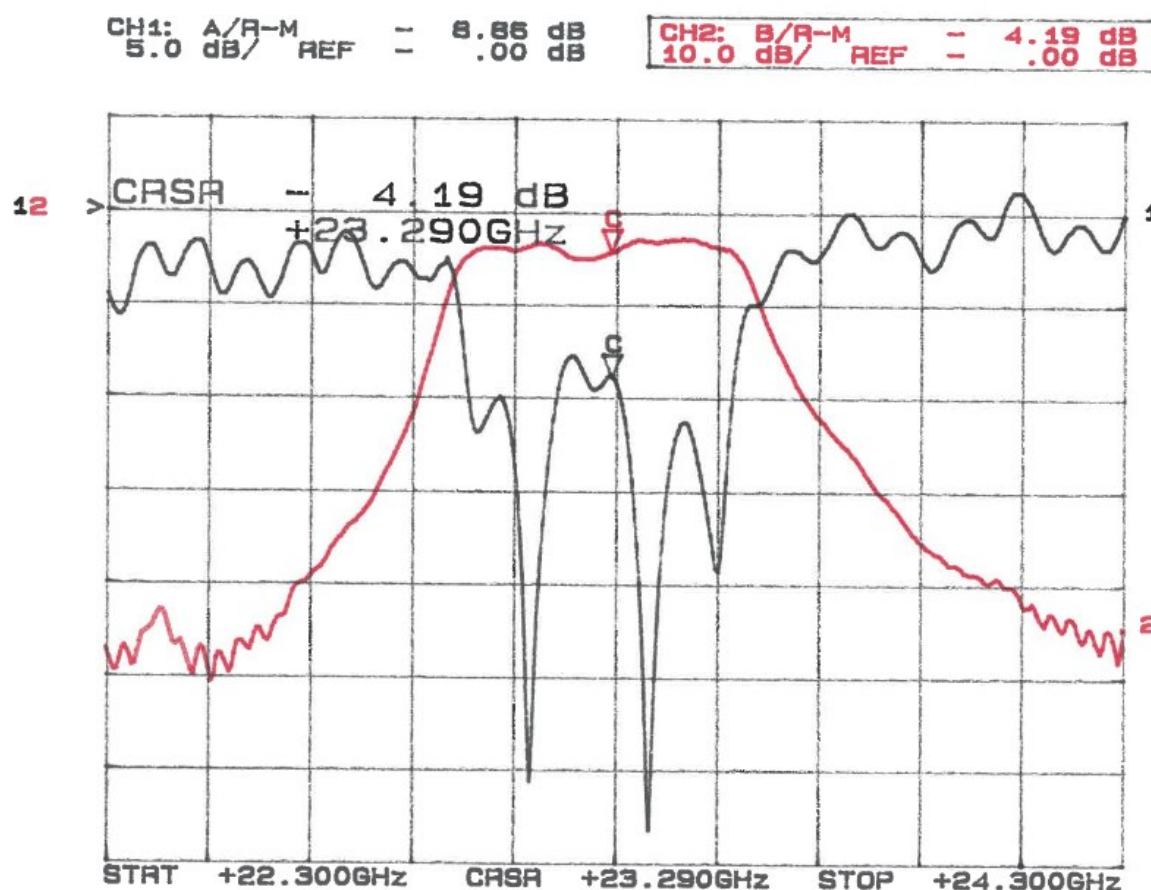


Obr. č. 27 - Součást po vyjmutí ze stříbrící lázně, dvojitým oplachu a vysušením pneumatickým fukarem a v sušičce

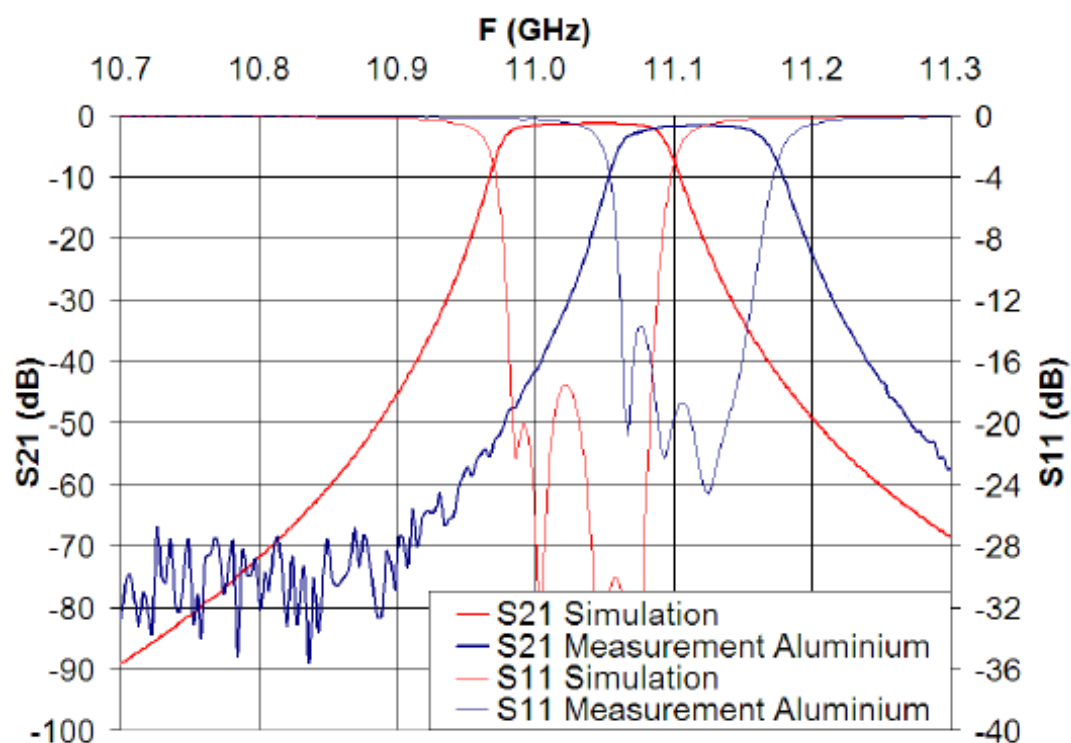
Jak je patrné z fotografie, byl pro zavěšení součásti použit hliníkový drát, který je taktéž postříbřen a na předchozí fotografii poměděn. Dále byl stejným postupem (bez konečného chemického stříbření) poniklován hliníkový drát a součást z hliníkové slitiny na vrstvu 5 μm . Tohoto zjištění je možné využít, pokud by bylo potřeba aplikovat chemický Nikl nebo některý jeho kompozit např. NiFLOR (niklová lázeň s rovnoměrně rozprostřenými mikročásticemi PTFE) na součást vytištěnou ze slitiny AlSi10Mg. Zmíněný NiFLOR se pro příklad vyznačuje nízkým součinitelem tření a zároveň relativně vysokou tvrdostí finálního povrchu.

16. Měření 24 GHz filtru na síťovém analyzátoru a zhodnocení výsledků měření

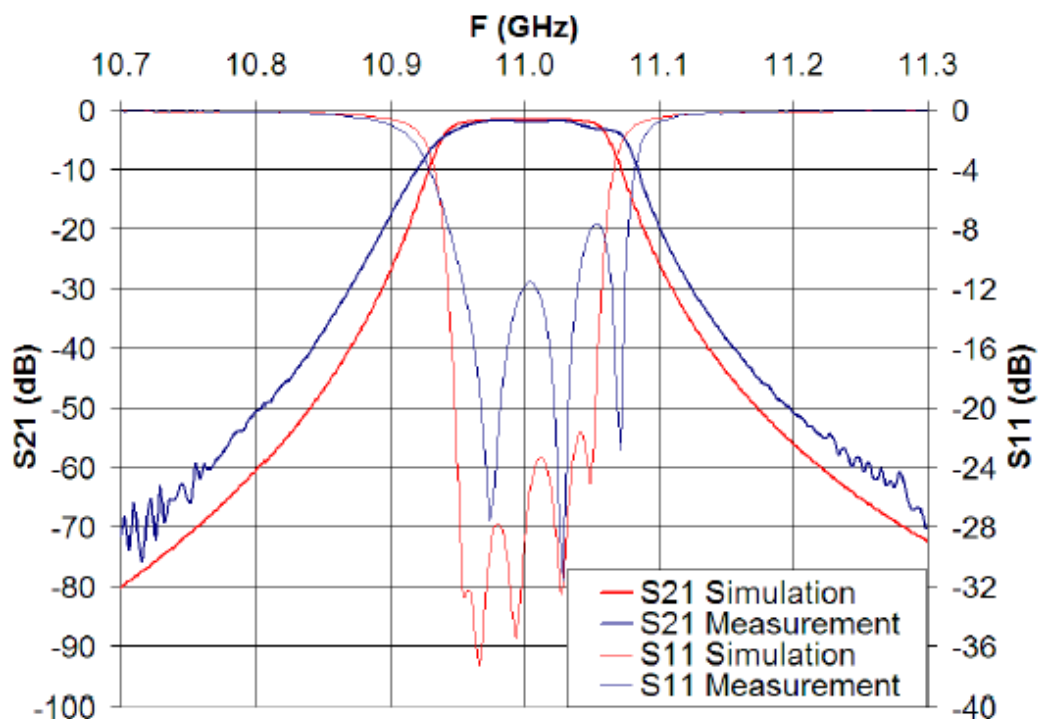
Filtr byl opět změřen na síťovém analyzátoru v rozsahu 22 300 MHz až 24 300 MHz, kdy z výstupu měření vyplývá, že změřená charakteristika odpovídá hodnotám neladěného filtru. Pracovní rozsah laděného filtru pro toto pásmo by měl být od 24 050 MHz do 24 250 MHz. Z Graf č. 4 dále vyplývá, že je pracovní rozsah posunut o zhruba 700 MHz níže, což je v důsledku neladění, jak vyplývá z Graf č. 4, kdy se jedná o nižší pracovní frekvenci 11 GHz. Pro porovnání byly níže umístěny Graf č. 5 a Graf č. 6 ze studie, která sloužila jako výchozí motivace k této práci. Při dalších experimentech je třeba se zaměřit na zlepšení kvality povrchu tištěných součástí a za pomoci simulačních programů vyzkoušet, zda je možné vynechat krok ladění tak, aby došlo k úspoře času při vývoji nových filtrů.



Graf č. 4 - Protokol o měření, kde parametr S_{11} se v bočních částech grafu nachází v jeho horní části (černě), při čemž měřítko je 5 dB na jeden čtverec a nulová hladina je vyznačena písmeny CSR a šipkou doprava, a dále parametr S_{21} roste v levé části grafu, v prostřední části grafu se drží v jeho horní části a klesá v pravé části grafu (červeně). Pro parametr S_{21} platí stejná nulová hladina a měřítko je 10 dB na jeden čtverec.



Graf č. 5 - Impedanční přizpůsobení (S11) a průchozí útlum (S21) pro volně tvarovaný 11 GHz filtr²



Graf č. 6 - Impedanční přizpůsobení (S11) a průchozí útlum (S21) pro konzervativně tvarovaný 11 GHz filtr²

17. Ekonomické předpoklady pro výrobu prototypů a ověřovací série

Jak je patrné z předchozích kapitol, při vývoji mechanických mikrovlnných součástí je nutno vždy vyrobit několik prototypů, případně ověřovací sérii, která je použita pro různé certifikace, ať už se jedná o měření v akreditovaných laboratořích TUV-SUD nebo různé certifikace pro zámoří apod. Experimentální demonstrátor filtru pro 24 GHz byl vytištěn z hliníkové slitiny AlSi10Mg odborníky z Brna při odhadovaných nákladech cca 12 000Kč.

Jelikož v běžné praxi je třeba strojařského technologa, jehož jedinou pracovní náplní je připravovat výrobu mikrovlnných součástí (ať už jednotlivých prototypů, ověřovacích či řádných sérií) na základě návrhů a 3D modelů připravených vývojáři samotných mikrovlnných součástí, několik vývojářů sdělilo, že vidí potenciál právě při výrobě prototypů a ověřovacích sérií. Jako důvod neuvedli přímo ušetření mzdových nákladů příslušného technologa, což se samozřejmě také nabízí, ale hlavně komunikační bariéru mezi výrobcem a elektrotechnickým vývojářem. Z jejich pohledu je velká šance odstranit problémy např. se spojovacím materiálem, při čemž jsou všechny tyto výzvy dobře patrné z použité literatury zabývající se metodikami a postupy vývoje mechanických mikrovlnných součástí, zejména. Někdy se také prototypy vyrábějí z polymerů s kovovým povlakem a sériové výrobky z kovů, což je časově i finančně výhodnější, ale vývojáři neotestují výrobek s finálním materiálem. Tato nevýhoda je konkrétně metodou SLM velmi dobře odbourána. ¹

Co se týká povrchových úprav, bude asi vhodnější, aby byla zřízena malá laboratoř při vývojovém oddělení, kde budou na vzorky aplikovány uvedené povrchové úpravy. Kusová výroba v galvanovnách je totiž nepraktická a logistika je v takových případech zbytečně drahá. Z provedeného experimentu je patrné, že při malých ověřovacích sériích je lepší aplikovat chemické povrchové úpravy vlastními silami, než se obracet na některou z velkých galvanoven. U elektrolytického leštění je provedené náročnější, ale při neveliké investici a poskytnutí prostoru pro úvodní experimentování, které by pracovníkům vývoje dalo základní zkušenosti ohledně elektrolytického leštění, by realizace vlastními silami nemusel být problém. Nutno dodat, že je problematický přítomnost relativně agresivních žiravin, oproti např. provedenému chemickému stříbření a jeho předúpravám.

18. Ekonomické předpoklady pro sériovou výrobu

Při zavedení sériové výroby by bylo potřeba náklady cca 4x snížit bez ohledu na větší potenciál technologie. Je nutné zmínit, že při započítání větších možností pro tvarovou složitost mechanických mikrovlnných komponent, které jsou nastíněny v předchozích kapitolách, nemusí být potřeba snížení nákladů tisku pro sériovou výrobu natolik značná. Bude-li to například nutné při zavádění dnes veřejnosti dobře známých 5G mobilních sítí, a bude-li třeba používat několik mikrovlnných mechanických komponent integrovaných do jediného celku, může se ukázat, že nebude konvenční výroba vůbec možná.

Anglický výrobce Renishaw před zhruba rokem představil velmi kompaktní model RenAM 500Q s velikostí pracovní komory 250x250x350 mm, ve které by bylo teoreticky možné naráz tisknout minimálně 72 v této práci experimentálně vyráběných vzorků, které by byly umístěny v 6 sloupcích a 6 řadách a dvou patrech nad sebou, kdy by bylo zajištěno až 4x zrychlení výroby s pomocí 4 výkonných 500wattových laserů. ⁴



Obr. č. 28 - Nové zařízení RenAM 500Q od společnosti Renishaw (ilustrační fotografie) ⁴

Pokud bude zjištěn objem experimentálně vyráběného filtru pro 24 GHz resp. průchodky pro 10 GHz, kdy objem činí 14 075 mm³ resp. 37 109 mm³, je možno vypočítat dobu tisku 72 resp. 50 kusů (průchodka má větší rozměry, které by však šly do určité míry optimalizovat) při rychlosti tisku 150 000 mm³ za ideálních podmínek. Prostou kalkulací je spočteno 6 hodin 46 minut pro 72 kusů 24 GHz filtrů a 12 hodin 23 minut pro 50 kusů 10 GHz průchodek. ⁵

Co se týče vstupních investičních nákladů cca 1,2 mil. Euro, nejsou nijak vysoké v porovnání s ostatním vybavením, jako jsou měřicí přístroje (mnoho přístrojů

s jednotkovou cenou milionů Kč) nebo linky pro osazování hradlových polí či různých chipsetů (cena za linku na klíč v řádu vyšších desítek milionů Kč). Případně je možné založit společnou laboratoř mezi dvěma nebo třemi výrobci anebo využít Evropských operačních programů.

Ohledně povrchových úprav by pro sériovou výrobu bylo vhodné oslovit některou renomovanou galvanovnu, kdy rozhodující by měla být ochota provádět všechny zmíněné povrchové úpravy nutné pro výrobu příslušných mechanických mikrovlnných součástí tak, aby se snížila náročnost a nákladovost na logistiku. Dalšími parametry pro volbu vhodné galvanovny jsou samozřejmě cena a kvalita prováděných povrchových úprav, případně provedení zákaznického auditu u vážných kandidátů v případě opravdu velkého množství poptávaných služeb.

19. Závěr

Autor této práce nejprve prostudoval již provedené zahraniční experimenty, ze kterých byla čerpána motivace pro využití aditivní výroby – konkrétně SLM – k výrobě mechanických mikrovlnných součástí. Protože se jedná o oblast, kde se nabízí mnoho využití, byly vybrány dvě součásti k praktickému experimentu.

První součástí byla 11 GHz průchodka z nerezové oceli 316L, která měla posloužit jako první demonstrátor s cílem zjistit charakteristiku takto vyrobené součásti. Sice byly potvrzeny vynikající vlastnosti zařízení AM400, kdy naměřené výsledky 10 GHz průchodky překonaly mnohá očekávání, ale potvrdila se nevhodnost materiálu z hlediska elektrické vodivosti a drsnosti povrchu.

Autor tedy zkoumal možnosti elektrochemického leštění a povlakování povrchu vyhotovené součásti. Bohužel co se týče leštění nerezové oceli v ČR, je situace taková, že galvanovny nerady dělají jednotlivé kusy a proto byla jednání s několika z nich neúspěšná. Navíc se kvůli vnitřní dutině jedná o velmi časově náročnou operaci. Přestože elektrochemické leštění nebylo klíčové pro další průběh experimentální práce, bude v případě, že některá z galvanoven nakonec úspěšně leštění provede, vyleštěná součást předána vedoucímu práce k prezentaci podle potřeb pracoviště.

Další pozornost se ubírala k výrobě testovacího 24 GHz filtru, který byl navržen jako odlehčený derivát konvenčně vyráběného modelu a vyroben z hliníkové slitiny AlSi10Mg. Kvůli zvýšení elektrické vodivosti jeho povrchu byl chemicky aplikován stříbrný povlak, jemuž předcházely složité předúpravy a mezivrstvy zinkátu a imerzní mědi. Filtr byl poté změřen na stejném přístroji jako 11 GHz průchodka, kdy je patrná funkční charakteristika. Další experimentální práce by se měly zaměřit na optimalizaci parametrů aditivní výroby tak, aby byl povrch filtru o něco méně pórovitý. V takovém případě by bylo možné filtr ručně naladit a potvrdit pozitivní očekávání. Chemické stříbření a samotnou slitinu AlSi10Mg lze ale z dokumentovaných měření pokládat za dobrou kombinaci. Lze tedy potvrdit závěry zahraničních studií, které byly brány jako motivace.

Autor se v jejích několika posledních kapitolách rovněž věnuje ekonomickému hodnocení výroby mechanických mikrovlnných komponent pomocí aditivní výroby metodou SLM.

Autor rovněž považuje za důležité, že se mohl seznámit s problematikou výroby mechanických mikrovlnných součástí, a ověřit si závěry uvedené v zahraničních studiích. Nutno poznamenat, že veřejné zprávy z výsledků zahraničních studií jsou v některých oblastech nekonkrétní, a praktické zkušenosti s obdobnými experimenty jsou nenahraditelným předpokladem pro navázání na tyto zahraniční studie v dalších experimentálních pracích. Klíčem je budoucí využití simulačních programů k výzkumu a vývoji nových mikrovlnných součástí s větší tvarovou a strukturální volností. Hlavním úkolem různých experimentálních projektů je hlavně ukázat výhody nových strojařských metod a přístupů vedoucím vývojových týmů a TOP managerům elektrotechnických firem. Z důvodu, že jakékoliv reálné zavedení do praxe v tomto případě vyžaduje spolupráci napříč několika odvětvími.

Použitá literatura

1. ESKELINEN, Harri a Pekka ESKELINEN. *Microwave component mechanics*. Boston, MA: Artech House, c2003. ISBN 1-58053-368-x.
2. Lorente, J.A. & Mendoza, Mónica & Petersson, A.Z. & Pambaguian, Laurent & Melcón, Alejandro & Ernst, C. (2009). Single part microwave filters made from selective laser melting. 1421 - 1424. 10.1109/EUMC.2009.5296127.
3. www.funchem.cz [cit. 2019-04-30]
4. www.konstrukter.cz/renishaw-avedla-na-trh-svuj-nejnovejsi-stroj-pro-3d-tisk [cit. 2019-04-30]
5. www.renishaw.com [cit. 2019-04-30]
6. Calignano, Flaviana & Peverini, Oscar & Addamo, Giuseppe & Paonessa, F & Manfredi, Diego & Galati, Manuela & Salmi, Alessandro & Atzeni, Eleonora & Minetola, Paolo & Iuliano, Luca. (2019). High-performance microwave waveguide devices produced by laser powder bed fusion process. *Procedia CIRP*. 79. 85-88. 10.1016/j.procir.2019.02.016.
7. Tyagi, Pawan & Goulet, Tobias & Riso, Christopher & Klein, Kate & Garcia-Moreno, Francisco. (2018). ELECTROPOLISHING OF ADDITIVELY MANUFACTURED HIGH CARBON GRADE 316 STAINLESS STEEL. 10.31224/osf.io/5dn49.
8. Mukhtar, Sehrish & Asghar, Waqas & Butt, Zubair & Abbas, Zaheer & Ullah, Mudaser & Rahman, Rana Atta ur. (2018). Development and characterization of hot dip aluminide coated stainless steel 316L. *Journal of Central South University*. 2578-2588. 10.1007/s11771-018-3937-y.
9. Lorente, J.A. & Mendoza, Mónica & Petersson, A.Z. & Pambaguian, Laurent & Melcón, Alejandro & Ernst, C. (2009). Single part microwave filters made from selective laser melting. 1421 - 1424. 10.1109/EUMC.2009.5296127.
10. Venanzoni, Giuseppe & Dionigi, Marco & Tomassoni, Cristiano & Eleonori, D & Sorrentino, Roberto. (2017). 3D printing of X band waveguide resonators and filters. 1-2. 10.23919/URSIGASS.2017.8105407.
11. www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/chemicke-stribreni [cit. 2019-04-30]
12. <https://electronics.stackexchange.com/questions/268431/what-is-the-simple-meaning-of-te10-waveguide> [cit. 2019-04-30]

13. GIBSON, I; D. ROSEN a B. STUCKER. [i] Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. [/i] New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 1441911200.
14. Internal used development materials, Design of microwave filters, Volume II, 572 p.
15. Internal used development materials, Design of microwave filters, Volume I, 526 p.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při realizaci experimentální části této. Také děkuji Ústavu konstruování, FSI VUT Brno za výrobu filtru z hliníkové slitiny AlSi10Mg. Za úvodní konzultaci a poskytnutí několika materiálů, které byly využity jako důležité zdroje informací v oblasti telekomunikací bych chtěl poděkovat Ing. Vojtěchovi Klusáčkovi, Ph.D. A dále také všem, kteří zapůjčili nějaké měřicí či jiné vybavení pro hladký průběh experimentální části, anebo poskytli cenné rady a připomínky.

Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, registrační číslo „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.